



# HODNOCENÍ DRSNOSTI POVRCHU TEXTILIÍ S VYUŽITÍM METODY GRADIENTNÍCH POLÍ

## Diplomová práce

*Studijní program:* N3957 – Průmyslové inženýrství

*Studijní obor:* 3911T023 – Řízení jakosti

*Autor práce:* **Bc. Jan Hornych**

*Vedoucí práce:* Ing. Lenka Techniková





# EVALUATION OF TEXTILE SURFACE ROUGHNESS USING GRADIENT FIELDS METHOD

## Diploma thesis

*Study programme:* N3957 – Industrial Engineering

*Study branch:* 3911T023 – Quality Control

*Author:* **Bc. Jan Horych**

*Supervisor:* Ing. Lenka Techniková



Tento list nahradte  
originálem zadání.

## Prohlášení

Byl jsem seznámen s tím, že na mou diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé diplomové práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li diplomovou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti TUL; v tomto případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Diplomovou práci jsem vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím mé diplomové práce a konzultantem.

Současně čestně prohlašuji, že tištěná verze práce se shoduje s elektronickou verzí, vloženou do IS STAG.

Datum:

Podpis:

## **Poděkování**

Děkuji své vedoucí diplomové práce Ing. Lence Technikové za odborné vedení, trpělivost, cenné rady a veškerý čas, který mi věnovala. Dále děkuji rodině, svým přátelům a blízkým za podporu při psaní diplomové práce.

## **Anotace**

Tato diplomová práce se zabývá objektivním bezkontaktním hodnocením drsnosti povrchu textilie na základě 3D rekonstrukce povrchu textilie s využitím metody gradientních polí. Základní myšlenkou je tvorba gradientu šikmým osvětlením textilie ze čtyř stran. 3D povrch je zrekonstruován na základě speciálního algoritmu pouze ze dvou gradientních obrazů. Následně byly ze získaného 3D povrchu počítány jednotlivé povrchové charakteristiky. Pro zjištění efektivity byly výsledky navržené metody porovnány s výsledky dalších dvou metod pro kontaktní i bezkontaktní měření drsnosti povrchu textilie.

**Klíčová slova:** Drsnost povrchu, obrazová analýza, 3D rekonstrukce povrchu textilií, gradientní pole, subjektivní a objektivní hodnocení drsnosti povrchu

## **Annotation**

This diploma thesis deals with objective contactless evaluation of textile surface roughness based on 3D reconstruction using the gradient field method. The basic idea is to create gradient fields using artificial lighting from four sides. 3D surface is reconstructed using special algorithm with only two gradient images. Subsequently, individual surface characteristics were calculated from obtained 3D image. To determine the effectiveness of the proposed method, the results were compared with results of other two methods for contact and contactless measurement of textile surface roughness.

**Keywords:** Surface roughness, image analysis, 3D reconstruction of textile surface, gradient field, subjective and objective evaluation of surface roughness

## Obsah

1	Úvod.....	12
2	Přehled současné situace.....	13
TEORETICKÁ ČÁST .....		16
3	Drsnost povrchu .....	16
3.1	Subjektivní metoda hodnocení omaku - drsnosti povrchu textilií .....	18
3.2	Objektivní metody hodnocení drsnosti povrchu .....	19
3.2.1	Objektivní kontaktní metody hodnocení drsnosti povrchu textilie.....	20
3.2.2	Objektivní bezkontaktní metody hodnocení drsnosti povrchu textilie .....	22
4	Standardní parametry drsnosti povrchu .....	24
4.1	Normalizované charakteristiky drsnosti povrchu.....	28
4.2	Nenormalizované charakteristiky drsnosti povrchu .....	35
EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST .....		38
5	Návrh objektivní metody pro měření drsnosti povrchu textilie.....	38
5.1	Obrazová sada vzorků .....	38
5.2	Princip snímání povrchu vzorků .....	41
5.3	Předzpracování obrazů vzorků textilií .....	42
5.4	3D rekonstrukce povrchu vzorků .....	43
5.5	Zpracování 3D povrchu.....	48
5.6	Extrakce jednotlivých charakteristik z 3D povrchu vzorků.....	49
6	Porovnání navrhované metody s ostatními metodami.....	52
6.1	KES - kontaktní metoda měření drsnosti povrchu textilie .....	53
6.2	Talysurf - bezkontaktní metoda měření drsnosti povrchu textilie .....	54
6.3	Statistické zpracování výsledků .....	56
6.4	Diskuze k získaným výsledkům.....	60
7	Závěr .....	63
Seznam použité literatury: .....		65
Seznam příloh .....		67

## Seznam obrázků:

Obrázek 1 Systém KES.....	22
Obrázek 2 Přístroj Talysurf a princip snímání povrchu.....	23
Obrázek 3 Střední čára profilu.....	24
Obrázek 4 Střední aritmetická čára profilu.....	25
Obrázek 5 Odchylka profilu .....	25
Obrázek 6 Místní výstupky a prohlubně profilu.....	26
Obrázek 7 Nerovnosti profilu .....	27
Obrázek 8 Výstupky profilu .....	27
Obrázek 9 Prohlubně profilu.....	28
Obrázek 10 Střední aritmetická odchylka profilu.....	29
Obrázek 11 Výška nerovností profilu z deseti bodů.....	30
Obrázek 12 Největší výška nerovností profilu .....	31
Obrázek 13 Střední rozteč nerovností profilů.....	32
Obrázek 14 Střední rozteč místních výstupků .....	32
Obrázek 15 Nosný podíl .....	33
Obrázek 16 Průměrná výška vrcholů.....	34
Obrázek 17 Průměrná výška prohlubní .....	34
Obrázek 18 Obrazová sada vzorků 1-30.....	39
Obrázek 19 Snímací systém obrazu a detail osvětlení .....	41
Obrázek 20 Jasové transformace obrazu vzorku 1 .....	42
Obrázek 21 Rekonstrukce 3D povrchu mince .....	44
Obrázek 22 Rekonstrukce 3D povrchu vzorku 1 .....	46
Obrázek 23 Rekonstrukce 3D povrchu vzorku 12.....	47
Obrázek 24 Eliminace šumu u vzorků 1 a 12 .....	48
Obrázek 25 Profily získané navrhovanou metodou.....	50
Obrázek 26 Vybraná sada vzorků pro porovnání efektivnosti testovaných metod .....	52
Obrázek 27 Profily naměřené systémem KES.....	53
Obrázek 28 Profily naměřené přístrojem Talysurf .....	55
Obrázek 29 Graf $p$ -hodnot pro sadu jednobarevných textilií .....	58
Obrázek 30 Graf $p$ -hodnot pro sadu vzorovaných textilií .....	58



**Seznam tabulek:**

Tabulka 1 Specifikace reprezentativní sady vzorků .....	40
Tabulka 2 Hodnoty naměřené navrhovanou metodou .....	51
Tabulka 3 Hodnoty naměřené systémem KES .....	54
Tabulka 4 Hodnoty naměřené Talysurfem .....	55
Tabulka 5 <i>P</i> -hodnoty jednotlivých charakteristik.....	57
Tabulka 6 Hodnoty naměřené navrhovanou metodou pro reprezentativní sadu vzorků	61
Tabulka 7 Hodnoty naměřené systémem KES pro reprezentativní sadu vzorků .....	61
Tabulka 8 Hodnoty naměřené přístrojem Talysurf pro reprezentativní sadu vzorků .....	62
Tabulka 9 Porovnání metod pro jednotlivé charakteristiky jednobarevných vzorků .....	62
Tabulka 10 Porovnání metod pro jednotlivé charakteristiky vzorovaných vzorků .....	62
Tabulka 11 Naměřené hodnoty neporovnávaných vzorků .....	13
Tabulka 12 Naměřené hodnoty neporovnávaných vzorků .....	13
Tabulka 13 Naměřené hodnoty neporovnávaných vzorků .....	14
Tabulka 14 Naměřené hodnoty neporovnávaných vzorků .....	14

## Seznam použitých symbolů:

3D	Třidimenzionální rozměr
KES	Kawabata Evaluation System
RCM	Roughness Contactless Measurement
CCD	Charge-Coupled Device
ČSN EN ISO	Harmonizované Evropské normy
$m$	Střední čára profilu
$S_i$	Plocha profilu nad střední čarou profilu
$S'_i$	Plocha profilu pod střední čarou profilu
$l$	Délka profilu
$R$	Odchylka profilu
$x_i$	Souřadnice profilu
$MAD$	Střední aritmetická odchylka profilu
$TP$	Výška nerovností počítána z deseti hodnot profilu
$R_m$	Největší výška nerovností profilu
$Z_m$	Střední rozteč nerovností profilu
$Z$	Střední rozteč místních výstupků profilu
$t_p$	Nosný podíl
$MP$	Průměrná výška vrcholů
$MV$	Průměrná hloubka prohlubní
$R(x)$	Výška profilu v místě $x$
$\bar{R}$	Průměrná hodnota výšky profilu
$R_i$	Souřadnice profilu povrchu v mezích základní délky
$N$	Počet bodů profilu povrchu
$R_{pmi}$	Výška $i$ -tého nejvyššího výstupku profilu
$R_{vmi}$	Hloubka $i$ -té nejhlubší prohlubně
$R_{p\ max}$	Výška nejvyššího výstupku profilu
$R_{v\ max}$	Výška nejnižší prohlubně profilu
$l_l$	Délka úseku na střední čáře profilu
$k$	Počet průsečíků křivky profilu
$M$	Počet roztečí na střední čáře profilu
$Q$	Počet nejvyšších bodů výstupků profilu
$l_p$	Délka povrchové křivky profilu

$p$	Index určující polohu řezu profilu
$b$	Součet délek úseků vytvořených v poloze řezu materiálu
$P_i$	$i$ -tý vrchol profilu
$V_i$	$i$ -tá prohlubeň profilu
$SD$	Střední kvadratická odchylka profilu
$CV$	Variační koeficient výšky profilu
$PSC$	Průměrný čtverec směrnice profilu
$PC$	Průměrná křivost profilu
$MS$	Průměrná směrnice profilu
mm	Milimetr
LED	Light-Emitting Diode
W	Watt
A	Ampér
m	Metr
K	Kelvin
Lm	Lumen
cm	Centimetr
2D	Dvojdímenzionální rozměr
$g_x$	Gradient ve směru osy $x$
$g_y$	Gradient ve směru osy $y$
$I_a$	Obraz osvětlený zleva
$I_b$	Obraz osvětlený zprava
$I_c$	Obraz osvětlený shora
$I_d$	Obraz osvětlený zdola
$h$	Velikost masky
$\sigma$	Směrodatná odchylka
$r_1, r_2$	Souřadnice pixelů
$Sp$	Maximální vrchol profilu
$Sv$	Maximální prohlubeň profilu
$S5p$	Výška pěti největších vrcholů
$S5v$	Výška pěti největších prohlubní
$U$	Náhodná veličina
$\mu$	Střední hodnota
$x_0$	Bod profilu

$\text{dpi}$	Density per inch
$s_1^2, s_2^2$	Rozptyl
$y_{ij}$	Výsledek analýzy
$\mu_{ij}$	Skutečná "teoretická" hodnota výsledku analýzy
$\varepsilon_{ij}$	Náhodná chyba
$\alpha_i$	Efekt faktoru $X$
$\beta_j$	Efekt faktoru $Y$
$\tau_{ij}$	Efekt interakce faktorů $X$ a $Y$
$S$	Počet úrovní faktoru $X$
$T$	Počet úrovní faktoru $Y$
$H_0$	Nulová hypotéza
$H_1$	Alternativní hypotéza
$n_1, n_2$	Rozsahy výběrů
$m_i$	Střední hodnota

# 1 Úvod

Drsnost povrchu je důležitou vlastností povrchu, která přímo ovlivňuje kvalitu materiálu. Povrchové charakteristiky se obecně používají pro hodnocení kvality výrobků a její použitelnosti. Drsnost povrchu je také spojena s uživatelským komfortem, vzhledem a omakem textilie. Drsnost povrchu lze ovlivnit povrchovou úpravou, materiálem, vazbou, hmotností apod.

Problematika hodnocení drsnosti povrchu textilie sahá do 30. let dvacátého století, kdy se projevuje snaha vytvořit měřicí přístroje za účelem kontroly drsnosti povrchu. Do té doby nejrozšířenější metodou hodnocení drsnosti povrchu byla metoda subjektivní-zraková a hmatová. Subjektivní metoda spočívá v hodnocení vzorků vybranými respondenty. Objektivní metoda je založena na principu kvantitativního hodnocení drsnosti povrchu textilie pomocí měřících zařízení konstrukcí. Objektivní metody se dále dají rozdělit na bezkontaktní a kontaktní. Bezkontaktní metody jsou založené na principu optického snímání povrchu textilie, u nichž nedochází k deformaci povrchu. Kontaktní metody jsou založené na pohybu snímacího hrotu po textilií a zaznamenávání nerovností povrchu textilie. Nevýhodou těchto měření je deformace povrchu, kde může dojít i ke zkreslení naměřených hodnot.

Hlavním cílem této práce je navrhnout efektivní, rychlou a přístrojově nenáročnou metodu objektivního bezkontaktního hodnocení drsnosti povrchu textilie s využitím metody gradientních polí. Spolu s vytvořením algoritmu pro měření povrchových charakteristik. Pro tvorbu 3D povrchu na základě metody gradientních polí bude zapotřebí pouze fotoaparátu a speciálního osvětlení. V prvním kroku se nasnímají vzorky šikmo osvětlené ze 4 stran a následně se z této sady získají odhady dvou gradientních polí. Z těchto odhadů je získán pomocí speciálního algoritmu rekonstruovaný 3D povrch textilie. Výstupem této práce budou povrchové charakteristiky, které popisují drsnost povrchu. Pro zjištění efektivnosti navrhované metody budou její výsledky porovnávány s výsledky vybraných dvou metod hodnocení drsnosti povrchu textilií.

Teoretická část se zabývá problematikou hodnocení drsnosti povrchu textilií, jejím vývojem od počátku až po přístroje používané v současné době. Dále budou popsány vybrané metody hodnocení drsnosti povrchu textilií pro zjištění efektivnosti navrhované metody. Experimentální část této práce obsahuje princip navrhované metody pro hodnocení drsnosti povrchu textilií.

## 2 Přehled současné situace

V rámci hodnocení drsnosti textilie se nejvíce používají jak metody kontaktní, tak metody bezkontaktní. Mezi nejvíce používané kontaktní metody patří Kawabata systém (KES) a Tloušťkoměr SDL M 034/1. Mezi bezkontaktní metody řadíme například profilometry, měření pomocí kamer a měření textilie ohnuté přes hranu. Využitím obrazové analýzy pro hodnocení drsnosti povrchu textilie se zabývá několik studií, které jsou uvedeny níže.

Autoři studie [1] se zabývali měřením drsnosti povrchu pletenin za použití obrazové analýzy. Měření pomocí systému KES, který patří mezi standardní měřicí metody, je časově náročné. Navíc systém KES patří do kontaktních metod měření a je tak velmi lehce narušován okolními podmínkami jako například vlhkostí. Proto se autoři zaměřili na měření drsnosti povrchu pletenin bez jakýchkoli deformací, tzn. bezkontaktní metodou pomocí scanneru s vysokým rozlišením. Data byla kontrolována programem MATLAB za účelem získání indexu drsnosti. Dále byla data porovnána s povrchovými charakteristikami naměřenými systémem KES. Výsledky obou metod ukazují korelaci mezi naměřenými hodnotami. Navíc negativní koeficient korelace ukazuje, že hodnota drsnosti naměřená systémem KES se mění přímo úměrně k hodnotám měřeným obrazovou analýzou. Bezkontaktní metoda měření drsnosti povrchu za použití scanneru s vysokým rozlišením se ukázala jako vhodná k popisu drsnosti povrchu pleteniny.

Autoři práce [2] hledali nový přístup k bezkontaktnímu měření drsnosti povrchu. Pro opatření informace o drsnosti povrchu v požadovaném směru bylo potřeba textilií ohnout přes hranu. Obrazová analýza byla použita pro získání profilu drsnosti povrchu ve dvou směrech. Hodnocení drsnosti tkanin pomocí zařízení RCM pro bezkontaktní měření drsnosti povrchu se ukázalo jako vhodný nástroj pro popis profilů povrchu i na celé rovině. Tato metoda nahrazuje tradiční metodu pomocí kontaktního profilování. Zmíněná metoda skládá drsnost povrchu z několika jednotlivých profilů.

Další bezkontaktní metodu měření drsnosti povrchu textilií shrnuje článek [3]. Základním principem této metody je usměrňování laserového paprsku procházejícího fotodiodou na povrch tkaniny. Tento paprsek je následně převáděn na signál

elektrického napětí. Výslednou hodnotou je frekvence vrcholů, která je dána strukturou a hustotou tkaniny. Výška vrcholů závisí na energii odraženého paprsku na příslušné frekvenci. Výsledkem tohoto bezkontaktního měření je pak výška profilu.

Hlavním cílem práce [4] je kvantitativní popis drsnosti povrchu založený na výšce profilu. Autoři této práce realizovali hodnocení povrchu za pomoci výšky profilu. Hlavním krokem této studie je kontrola spektrální hustoty výkonu, variogram chování (nebo autokorelační funkce) a klasifikace profilu výšky do skupin. Autoři vypočítali charakteristiky drsnosti povrchu a výsledky navrhovaného postupu byly ověřeny na simulovaných výškách profilu a na praktických příkladech.

Autoři článku [5] hodnotili změny povrchu netkaných textilií po opakovaném oděru. Autoři následně získali data o povrchu z 3D obrazu pomocí metody obrazové analýzy a byl počítán fraktální rozměr pro hodnocení drsnosti povrchu. Fraktální rozměr se zvyšoval při zvyšování počtu oděru. Data byla porovnána s hodnotami získanými systémem KES. Metoda vyžaduje okamžité měření a je objektivní, a proto je vhodná pro okamžitou kontrolu.

Systém KES pro hodnocení drsnosti povrchu textilie je založen na kontaktním měření, a tím dochází k deformaci textilie. Proto autoři článku [6] měřili povrch bezkontaktní metodou za použití laserových senzorů s rozlišením 1  $\mu\text{m}$  s přesností 0,01%. Testované textilie byly chemicky ošetřeny za účelem omezení počtu chyb. Poté byly výsledky drsnosti povrchu různých textilií porovnány s výsledky naměřenými pomocí systému KES. Data jsou kontrolována na počítači a algoritmus navržený v MATLABU byl použit pro získání charakteristik drsnosti povrchu, průměrných hodnot a odchylek z třiceti vzorků plátňových a keprových tkanin. Autoři prezentovali porovnání mezi výsledky drsnosti textilií získanými bezkontaktní metodou se subjektivní smyslovou analýzou.

Článek [7] představuje metodu založenou na obrazové analýze siluety k vizualizaci trojrozměrného povrchu textilie a zkoumá princip hodnocení drsnosti povrchu na základě 3D rekonstrukce povrchu. Autoři této práce použili následující systém snímání obrazu: zdroj světla, vzorkovací fáze, zařízení na posun vzorku, detektor (CCD kamera) a software pro analýzu. Touto metodou byly získány informace

o povrchu textilie, která byla posouvána přes hranu. Tato nedestruktivní metoda je efektivní pro popis povrchu nebo detekci defektů způsobených ohybem. Tato metoda dokáže rekonstruovat 3D povrch, zatímco eliminuje informaci o barvě a stínu. Tím se metoda vyhne problému stínů a tmavých barev, což je problém pro tradiční analýzy 2D obrazu. KES systém je použit na porovnání efektivnosti tohoto navrhovaného systému a experiment ukazuje dobrou korelaci mezi výsledky metod.

Autoři článku [8] popsali přístup bezkontaktního měření drsnosti povrchu vzorované textilie. Na základě textilie ohnuté přes hranu a CCD kamery byl získán profil drsnosti povrchu. Použitý systém umožnil získat sadu profilů povrchu textilie v různých místech. Za účelem získání profilu povrchu textilie autoři použili obrazovou analýzu. 2D obraz povrchu byl následně poskládán ze získaných profilů povrchu. Pro popis drsnosti povrchu byla použita procedura založená na Fourierově transformaci. Použitelnost tohoto přístupu byla demonstrována na jednom typu manšestrové textilie.



## TEORETICKÁ ČÁST

### 3 Drsnost povrchu

Drsnost patří mezi povrchové vlastnosti plošných textilií. Drsnost povrchu je souhrn nerovností, tj. výstupků a prohlubní skutečného povrchu plochy. Je určována mezi dvěma povrchy (při hodnocení omaku mezi rukou a plošnou textilií). Drsnost povrchu textilie lze ovlivnit těmito způsoby:

- povrchovou úpravou,
- použitým materiálem,
- vazbou,
- plošnou hmotností - čím vyšší plošná hmotnost, tím se textilie jeví jako hladší,
- zákrutem příze - čím je příze více zakroucená, tím má větší počet zákrutů a klade větší odpor při ohýbání, ke kterému dochází při tkaní, tudíž zapříčiňuje vystupování osnovy nebo útku z tkaniny a tím ovlivňuje celkovou drsnost [9].

V 30. letech se začaly v technicky vyspělých státech vyvíjet metody za účelem tvorby měřících přístrojů, kterými by bylo možné kontrolovat drsnost povrchů a vyjadřovat ji mezinárodně srovnatelnou jednotkou. Do té doby byla nejrozšířenější subjektivní zraková a hmatová kontrola. Zvyšováním nároků se ale urychlil vývoj v oblasti hodnocení drsnosti povrchu, a tak bylo subjektivní hodnocení postupně nahrazeno kvantitativním měřením. První měřící přístroje pro měření drsnosti povrchu získaly hodnoty drsnosti při pohybu snímacího hrotu kolmo k výrobku. Později byly přístroje vybaveny i zapisovacím zařízením, vypočítávaly průměrné hodnoty drsnosti a dokázaly zaznamenat i křivku profilu [9].

Jednou z nejdůležitějších částí zařízení pro měření drsnosti povrchu je snímač. Jeho malý zdvih kombinovaný s velmi malou přitlačnou silou a velkým zvětšením zapříčinily vývoj velmi citlivých zařízení, která musí splňovat všechny požadavky přístroje vhodného pro tyto účely. Závažným problémem bylo snímání při malé rychlosti a při malé dráze. Dráha po textilií totiž musí být taková, aby dala dostatek informací o drsnosti, vlnitosti a odchylkách tvaru. Výběr nepravidelností, které jsou měřeny jako drsnost povrchu, je založen na koncepci, která vychází z dostatečně dlouhé základní délky, aby respektovala drsnost, ale zároveň dostatečně krátké, aby

zanedbávala vlnitost textilie. Důležité je stanovit střední čáru profilu, protože právě k ní jsou charakteristiky drsnosti povrchu vztaženy [9].

Měření drsnosti povrchu může vycházet ze dvou metod:

### **1) Systém 2D hodnocení drsnosti povrchu**

Výstupem tohoto hodnocení je křivka profilu povrchu. Na tomto systému jsou založeny všechny dosavadní normy hodnocení drsnosti povrchu.

### **2) Systém 3D hodnocení drsnosti povrchu**

Snaha o podrobnější popis drsnosti povrchu vedla k vývoji řady metod pro 3D hodnocení povrchu. Nejvíce se v této době upřednostňují bezdotykové a optické metody snímání drsnosti povrchu [11].

Měření drsnosti povrchu se dá všeobecně rozdělit na objektivní a subjektivní. Metoda subjektivní je založena na vlastním pocitu člověka a metoda objektivní je založena na výsledku měření mechanických a fyziologických vlastností textilie. Jedním ze způsobů hodnocení povrchových vlastností textilních materiálů je subjektivní kontaktní metoda vyznačující se charakteristickým omakem pro daný textilní materiál. Pojem „omak” je obtížné jednoznačně definovat. Spadá do hodnocení jakosti textilií jako jedna z nejdůležitějších užitných vlastností a lze ho zařadit mezi subjektivní vjemy vyvolané částečně měřitelnými charakteristikami textilií. Omak patří mezi základní vlastnosti, které rozhodují o tom, jak spotřebitel textilii vnímá. Omak tvoří pocit, který spotřebitel vnímá při kontaktu textilie s povrchem těla. Tato vlastnost patří mezi vlastnosti psychofyzikální, které jsou kombinací různých mechanicko-fyzikálních vlastností v souladu s duševním rozpoložením spotřebitele. Nevhodný omak textilie tak může ovlivňovat psychiku člověka, kdy při svém dlouhodobém negativním působení může vést např. ke snížení koncentrace na pracovní úkony a k pocitům sníženého komfortu. Požadavek vhodného omaku je důležitý u všech typů oděvních textilií, včetně ochranných a pracovních oděvů. Samotný kontaktní způsob hodnocení drsnosti povrchu v podobě subjektivní metody byl velmi pravděpodobně aplikován od prvopočátků existence této vědní disciplíny. Objektivní kontaktní metoda, k jejíž realizaci je užito měřících přístrojů, je metodou vývojově mladší. Její počátky sahají do 30. let dvacátého století [11].

### 3.1 Subjektivní metoda hodnocení omaku - drsnosti povrchu textilií

Při subjektivním posuzování se určuje drsnost povrchu lidskými smysly. Například porovnáním kontrolovaného povrchu se vzorovými etalony zrakem a hmatem, popřípadě vizuálně jednoduchými optickými pomůckami, jako jsou lupy a komparační mikroskopy. Toto hodnocení je velmi důležité, jelikož je založené na požadavcích spotřebitelů. Výhodou je, že si spotřebitel může určit, jaká vlastnost dané textilie je pro něj důležitá, a zároveň k tomu není potřeba žádný měřicí přístroj a zařízení. To znamená, že toto hodnocení může provést téměř kdokoli. Velkou nevýhodou je naopak fakt, že každý hodnotitel je jiný. Každý člověk jinak vnímá a má individuální hmatovou citlivost, proto se výsledky mohou výrazně lišit. Z tohoto důvodu je důležité před každým testem tyto znaky co nejvíce eliminovat. Subjektivní hodnocení se dělí na dvě metody:

**1) přímá (absolutní) metoda**, která třídí textilie do zvolené subjektivní stupnice - ordinální škály s minimálním počtem 30 respondentů,

**2) nepřímá (komparativní) metoda**, která třídí textilie podle subjektivního kritéria hodnocení - porovnání textilií s nejpříjemnějším omakem a s nejhorším omakem; setřídění textilií od nejpříjemnější textilie po textilii s nejhorším omakem [11].

Pro zajištění reprodukovatelnosti a opakovatelnosti měření je potřeba stanovit 3 kritéria:

#### 1. Výběr hodnotitelů

Výsledky hodnocení omaku jsou silně ovlivňovány hodnotitelem. Jak již bylo řečeno, hodnocení omaku je založené na smyslových vlastnostech, a ty se u každého hodnotitele liší stejně jako psychický stav hodnotitelů, který je ovlivňován vnějšími podněty v okolí. Důležitý je také výběr hodnotitelů - specialistů, kteří se s omakem setkávají denně, a "laiků" (spotřebitelů) považovaných za neodborníky. Výsledky hodnocení omaku se proto mohou významně lišit.

#### 2. Výběr bodové škály

Podle cíle, kterého chceme dosáhnout hodnocením omaku (jestli chceme textilii porovnat s etalonem nebo mezi sebou), můžeme zvolit dva typy zkoušek:

**a) stupnicové zkoušky** - umožňují kvantitativní i kvalitativní popis hodnocení omaku. Hodnotitel zařazuje textilie zpravidla do liché bodové škály (5-ti nebo 11-ti bodová) s tím, že střední hodnota leží uprostřed škály.

**b) srovnávací zkoušky** - hodnotí textilie s jedním zvoleným vzorkem jako standard a zjišťuje se, jak moc se předložené vzorky liší od standardu.

### **3. Zavedení sémantiky**

Pro popis subjektivního hodnocení omaku a jeho složek existuje více než 100 vlastností. Proto nestačí hodnotit omak jako celek, ale je potřeba zavést a definovat primární složky omaku, jak se vzorků "dotýkat", na co se soustředit a v jakém pořadí složky hodnotit [11].

## **3.2 Objektivní metody hodnocení drsnosti povrchu**

S příchodem syntetických vláken se začala rozvíjet objektivní metoda hodnocení drsnosti povrchu. Je to tedy poměrně mladá metoda, která měla za účel nahradit časově náročnou metodu subjektivní a eliminovat tak lidský faktor při hodnocení drsnosti povrchu.

Objektivní metody se dají rozdělit do dvou základních skupin na kontaktní a bezkontaktní. Obě metody mají své výhody i nevýhody, které budou blíže popsány v následujících kapitolách.

V této době existuje několik metod, které se zabývají objektivním hodnocením povrchu. Mezi nejrozšířenější přístroje pro měření drsnosti povrchu textilie patří dotykové profilometry. Tyto profilometry patří do skupiny přístrojů s postupnou transformací profilu. Po měření povrchu se posouvá konstantní rychlostí dotykový snímač s velmi malým zaoblením hrotu, případně se posouvá kontrolovaná plocha pod měřícím snímačem. Změny výšky měřícího snímače jsou způsobeny nerovnostmi povrchu. Tyto změny se zaznamenávají buď ve tvaru profilogramů, nebo se u elektrických metod převádějí na analogové změny napětí či indukčnosti.

Mezi tyto typy přístrojů patří:

- 1) profilograf - dotykový přístroj, u něhož jsou výsledkem měření grafické záznamy profilů,
- 2) profilometr - dotykový přístroj vyhodnocující automaticky některé z normalizovaných charakteristik drsnosti povrchu,
- 3) profiloměr - kombinace obou výše uvedených přístupů [10].

Mezi zástupce přístrojů s podobnou konstrukcí lze zařadit i dotykový profilograf s mechanickým převodem. Toto měření je založené na krokování. Pákovým převodem

se zdvihal měřicí hrot a současně se posouval mikrometrickým šroubem stolek s měřeným vzorkem. Z naměřených hodnot bylo možné nakreslit profil měřeného povrchu. Tyto přístroje byly vylepšeny o princip mechanicko-optických dotykových profilografů, dotykových profilografů s mechanicko-pneumatickým převodem či o dotykové profiloměry s mechanicko-elektrickým převodem [10].

Tyto přístroje pak doplňují konstrukce například elektromagnetických, elektrodynamických, piezoelektrických, kapacitních a elektroinduktivních snímačů.

Jeden z dalších způsobů objektivního měření drsnosti povrchu je založen na nepřímém kvantitativním měření. Jedná se porovnávání kontrolované plochy s etalonem pomocí komparačních přístrojů založených na různých fyzikálních vlastnostech. Výsledkem toho měření bývá kvantitativní údaj o rozdílu drsnosti porovnávaných povrchů. Tyto přístroje jsou založeny na mechanickém principu, nebo se jedná o komparátory pneumatické, elektrické induktivní a fotoelektrické [10].

V diplomové práci je navržena metoda pro objektivní měření drsnosti povrchu porovnávána s měřicími přístroji KES (Kawabata Evaluation System) a Talysurfem CLI 500. Z tohoto důvodu následuje podrobnější popis obou systémů pro měření povrchové drsnosti materiálů

### **3.2.1 Objektivní kontaktní metody hodnocení drsnosti povrchu textilie**

Mezi kontaktní metody můžeme zařadit již zmiňovaný systém KES, Tloušťkoměr SDL m034/1, přídavné zařízení k dynamometru, které je založené na principu snímání odporu síly potřebné k pohybu hrotu po povrchu textilie. Mezi výhody kontaktní metody můžeme zařadit jednoduchost a časovou nenáročnost měření. Naopak nevýhodou může být deformace při měření a vysoká citlivost čidla na nerovnosti povrchu. Nevýhodou je také finanční a přístrojová náročnost kontaktních metod.

Hlavní součástí zařízení pro kontaktní měření je snímač, který kopíruje profil povrchu materiálu. Profil je charakterizován proměnlivostí tloušťky ve vybraných směrech [11].

## Systém KES

Systém KES (*Kawabata Evaluation System*), který stále patří k nejvíce využívané metodě objektivního měření drsnosti povrchu textilie, byl vytvořen pro objektivní predikci drsnosti povrchu textilií, zejména u tkanin. Tento systém umožňuje objektivně odhadnout celkové pocity většiny lidí při jejich přímém kontaktu s textilií. Systém KES je sada 4 přístrojů, které měří 15 vlastností textilie rozdělených do 5 skupin.

- tahové vlastnosti: linearita, deformační energie a pružnost v tahu,
- smykové vlastnosti: tuhost ve smyku, hystereze při úhlu smyku  $\phi=0,5^\circ$ , hystereze při úhlu smyku  $\phi=5^\circ$ ,
- ohybové vlastnosti: tuhost ohybu na jednotku délky, moment hystereze na jednotku délky,
- objemové vlastnosti: linearita, energie potřebná ke stlačení,
- povrchové vlastnosti: koeficient tření, průměrná odchylka, geometrická drsnost.

Tyto měřené vlastnosti simulují běžné namáhání oděvních textilií při nošení. Šestnáctou charakteristikou, která se používá při predikci omaku, je plošná hmotnost.

Hodnocení povrchu textilie systémem KES je založeno na získání profilu povrchu pomocí dotykového čidla. Ocelový drát o průměru 0,5 mm se pohybuje po textilií konstantní rychlostí  $1 \text{ mm.s}^{-1}$  v úseku dlouhém 20 mm. Systém náhodně vybere tři úseky po osnově a tři úseky po útku o délce 20 mm. Ocelový drát pohybující se po těchto úsecích zaznamenává nerovnosti povrchu textilie. V programu lze pak vykreslit jednotlivé křivky drsnosti povrchu nebo i zprůměrované křivky celého měření. Tento systém má řadu výhod a nevýhod. Výhody měření drsnosti povrchu textilie pomocí systému KES jsou následující:

- přímé grafické a statistické zpracování výsledků,
- konstrukce systému je vhodná pro běžné oděvní materiály,
- jednoduchost a časová nenáročnost měření.

Nevýhody měření drsnosti povrchu užitím KES:

- čidlo snímající profil povrchu textilie je příliš citlivé na nerovnosti povrchu,
- měření je omezené tloušťkou materiálů a je nevhodné pro extrémně drsné a hrubé materiály,

- měření je nepřesné u pletenin, neboť při měření dochází k roztažení textilie, a to má za následek zkreslení výsledků [10].

Tyto nevýhody systému KES vedou k vývoji nových objektivních metod, které by byly schopné slabé stránky systému eliminovat. Na obr. 1 je zobrazen systém KES pro měření povrchových charakteristik textilií.



Obrázek 1 Systém KES.

### 3.2.2 Objektivní bezkontaktní metody hodnocení drsnosti povrchu textilie

Metody bezkontaktního měření drsnosti povrchu jsou většinou založené na optickém měření. U bezkontaktních metod nedochází k poškození a deformaci povrchu, a proto je možné měřit téměř jakékoli materiály s různě členitým povrchem. Nevýhodou tohoto typu měření je časová náročnost v závislosti na nastavení parametrů. Finanční a přístrojová náročnost je zde také jako u kontaktních metod nevýhodou. Měření drsnosti povrchu jsou založené na principu světelného řezu, šikmého řezu nebo měření nosného podílu.

Měřicí bezkontaktní přístroje vycházejí z principu usměrňování laserového paprsku dopadajícího přes optickou soustavu na povrch textilie. Intenzita odraženého laserového paprsku je pomocí fotodiody převáděna na signál elektrického napětí, který je zpracováván Fourierovou analýzou. Nevýhodou přístrojů těchto konstrukcí je citlivost na chování laserového paprsku (odrazivost paprsku, speckleové obrazce, citlivost na změny barev a odstínů) [11].

## Talysurf CLI 500

Talysurf CLI 500 patří mezi bezkontaktní metody a byl v této práci také použit pro srovnání efektivnosti navrhované metody. Talysurf měří drsnost povrchu textílie na ploše maximálně 200 x 50 mm s výškovou nastavitelností v závislosti na výšce textílie. Princip snímání je založený na světelném paprsku, který je zaostřen na měřený povrch textílie. Odchylky textury povrchu jsou zaznamenány jako změny odraženého světla. Laser se pohybuje po řádcích vzorku a skládá jednotlivé profily k sobě až následně vykreslí celý profil snímaného vzorku.

Před každým měřením je potřeba si zvolit typ snímače (v tomto případě laserový snímač), rozsah snímání a směr měření. Dále je potřeba nastavit velikost snímané plochy, rychlost snímání a výsledné rozlišení. Rychlost snímání a velikost snímané plochy má velký vliv na celkový čas měření. Při nastavení rychlosti 2 mm/s na snímané ploše 1x1 cm trvá měření více než dvě hodiny. Na obr. 2 (a) je uveden přístroj Talysurf a (b) princip snímání povrchu textílie.

Mezi výhody bezkontaktního měření tímto přístrojem patří:

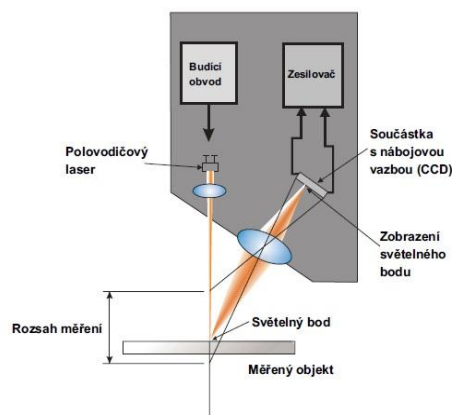
- obousměrné snímání povrchu,
- možnost měřit citlivé, pružné a měkké materiály,
- optické měřidlo je méně náchylné k opotřebení a poškození,
- nesnímá barvu, ale pouze výšku povrchu, což je výhodou zejména u vzorovaných textilií.

Mezi nevýhody řadíme:

- poměrně velká finanční investice,
- delší čas snímání v závislosti na nastavení parametrů [11].



(a)



(b)

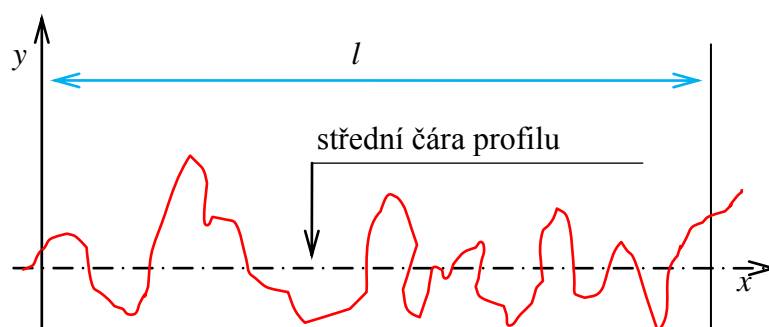
Obrázek 2 (a) Talysurf CLI 500, (b) princip laserového snímače.



## 4 Standardní parametry drsnosti povrchu

Pro objektivní hodnocení drsnosti povrchu textilie se používají veličiny drsnosti povrchu, které se stanovují a vyhodnocují vzhledem k základní čáře. V této části práce bude uvedeno několik pojmů, které se běžně využívají pro hodnocení drsnosti povrchu textilie. Dle Talysurfu se používají normy ČSN EN ISO 25178, EUR 15178N [12], [13]. Při praktickém hodnocení drsnosti povrchu v souladu normou ČSN EN ISO 25178-601 (01 4451) je touto základní čarou střední čára profilu, neboli přímka jmenovitého profilu. Rozděluje skutečný profil tak, že v rozsahu základní délky je součet druhých mocnin odchylek od této čáry nejmenší dle výrazu (1) [10]. Střední čára profilu je zobrazena na obr. 3.

$$\int_0^1 (y - \bar{y})^2 dx = \min. \quad (1)$$

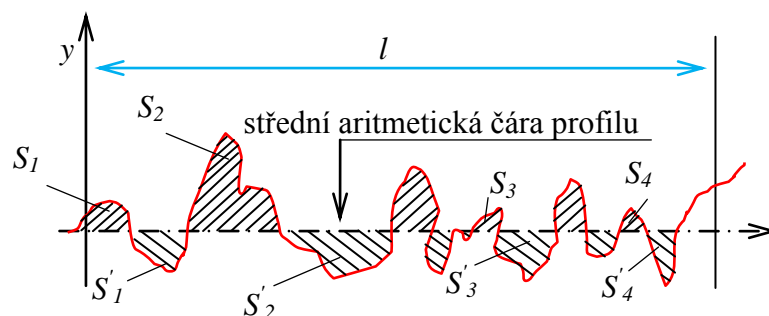


Obrázek 3 Střední čára profilu.

Střední aritmetická čára profilu  $m$  je základní čára neboli přímka jmenovitého profilu. Je ekvidistantní se směrem skutečného profilu a rozděluje skutečný profil tak, že v rozsahu základní délky jsou součty ploch po obou jejích stránkách stejné dle vzorce (2).

$$\sum_{i=1}^n S_i = \sum_{i=1}^n S'_i, \quad (2)$$

kde  $S_i$  představuje součet ploch nad střední aritmetickou čarou profilu  $m$ ,  $S'_i$  je součet ploch pod střední aritmetickou čarou  $m$  a  $n$  je počet těchto ploch. Na obr. 4 je uvedena střední aritmetická čára profilu a vyšrafované plochy profilu.



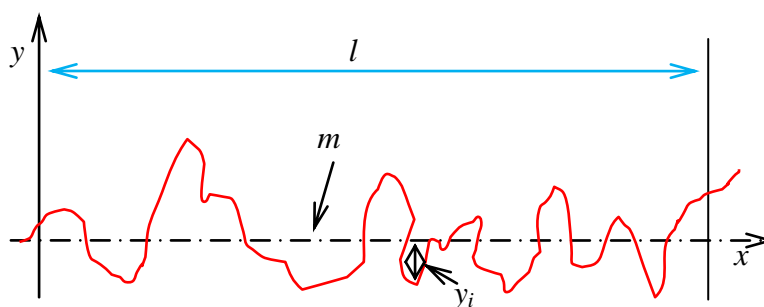
Obrázek 4 Střední aritmetická čára profilu.

Střední aritmetická čára profilu je v praxi snáze zjistitelná při grafickém zpracování profilu než střední čára profilu. Soustava střední čáry profilu je pak výpočetním systémem užívaná při vyhodnocování veličin profilu, u kterého byla přijata za základní čáru střední čára profilu. Tento systém je základem většiny mezinárodních a národních norem spojených s vyhodnocením drsnosti povrchu [10].

Délka profilu  $l$  je délka základní čáry užívaná pro oddělení nerovností charakterizujících drsnost povrchu, od jiných geometrických odchylek. Hranice mezi drsností povrchu a jinými druhy nerovností je v jistém smyslu libovolná. Fyzikálně zdůvodněná hranice mezi drsností povrchu a nerovnostmi převyšujícími základní délku dosud neexistuje.

Vzdálenost mezi bodem skutečného profilu a základní čarou se nazývá odchylka profilu  $R$ , resp.  $y$ . Odchylky profilu  $y$ , pokud se vyhodnocují z profilogramu, se měří v bodech osy  $x$  ve vzájemných vzdálenostech nazývaných krokem diskretizace dle výrazu (3). Na obr. 5 je zobrazena odchylka profilu  $y_i$ .

$$\Delta x = x_{i+1} - x_i. \quad (3)$$



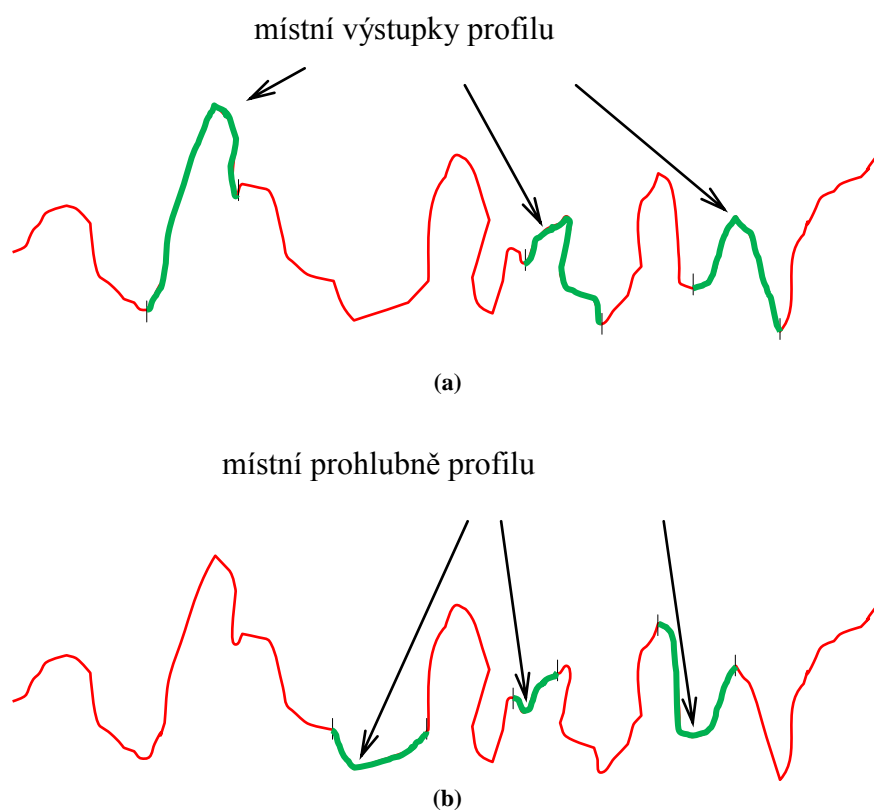
Obrázek 5 Odchylka profilu  $y_i$ .

Krok diskretizace je obvykle konstantní a na jeho velikosti pak závisí i přesnost vyhodnocení charakteristik drsnosti povrchu, v základě i určení střední čáry profilu. Se zvětšováním kroku diskretizace se zvětšují i chyby měření, některé nerovnosti profilu mohou pak být ve vyhodnocení zanedbány.

Při posuzování drsnosti povrchu je nutno dále rozlišovat na profilu povrchu místní nerovnosti profilu a nerovnosti profilu [10].

### Místní nerovnost profilu

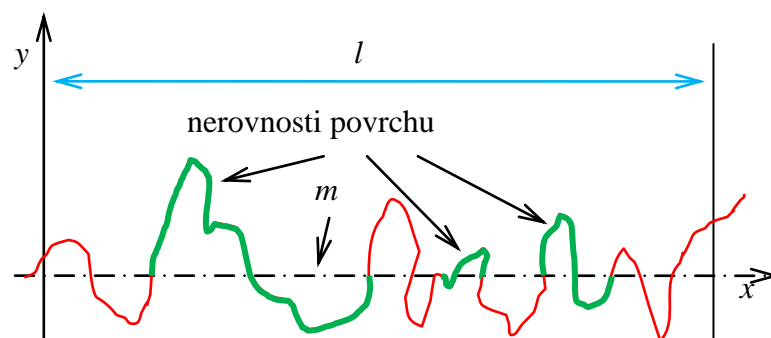
Místní nerovnost profilu je tvořena místním výstupkem a s ním spojenou místní prohlubní. Místní výstupek profilu je část skutečného profilu, která leží mezi dvěma sousedními nejnižšími body profilu. Místní prohlubeň profilu je pak část skutečného profilu, která leží mezi dvěma sousedními nejvyššími body profilu [10]. Na obr. 6 (a) jsou uvedeny místní výstupky profilu a (b) místní prohlubně profilu.



Obrázek 6 (a) místní výstupky profilu, (b) místní prohlubně profilu.

### Nerovnost profilu

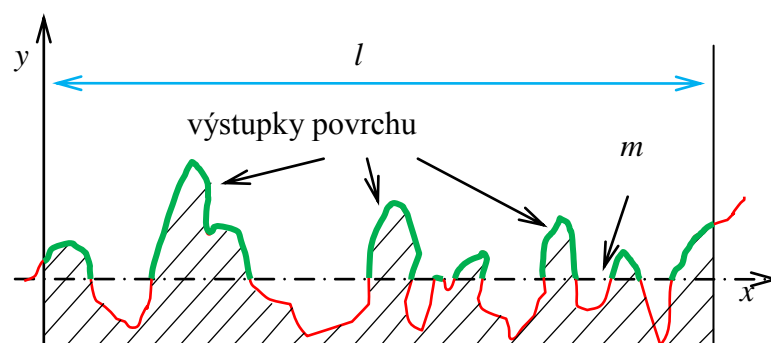
Nerovnost profilu tvoří výstupek profilu a s ním spojenou prohlubeň profilu [10]. Na obr. 7 je zobrazena nerovnost profilu.



Obrázek 7 Nerovnosti profilu.

### Výstupek profilu

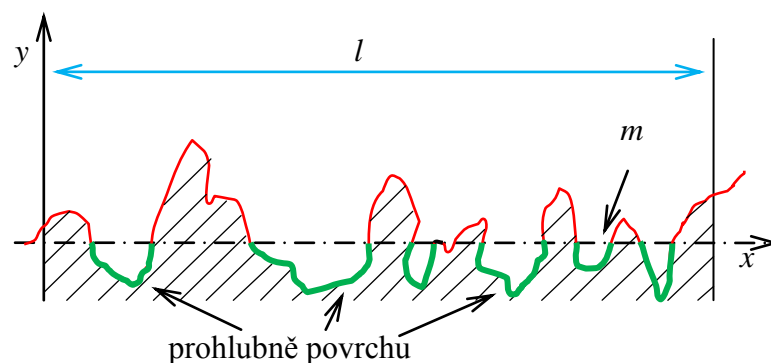
Výstupek profilu je část skutečného profilu uvažovaná směrem z materiálu spojující dva jeho sousedící průsečíky se střední čarou profilu. Části výstupků profilu na začátku nebo na konci profilu se považují za výstupky profilu [10]. Na obr. 8 jsou zobrazeny výstupky profilu.



Obrázek 8 Výstupky profilu.

### Prohlubeň profilu

Prohlubeň profilu je část skutečného profilu uvažovaná směrem do materiálu spojující dva jeho průsečíky se střední čarou profilu. Obdobně části prohlubně profilu na začátku nebo na konci základní délky se považují za prohlubně profilu [10]. Na obr. 9 jsou zobrazeny prohlubně profilu.



Obrázek 9 Prohlubně profilu.

#### 4.1 Normalizované charakteristiky drsnosti povrchu

Požadavky na drsnost povrchu se vyjadřují charakteristickým údajem drsnosti povrchu (buď jedním, nebo několika) a délkou profilu, na které je veličina určena.

Norma [ČSN 01 4451] definuje několik charakteristik, které slouží pro popis drsnosti povrchu textlie. Mezi tyto charakteristiky se řadí [10]:

$MAD$	střední aritmetická odchylka profilu
$TP (S10z)$	výška nerovností počítána z deseti hodnot profilu
$R_m$	největší výška nerovností profilu
$Z_m$	střední rozteč nerovností profilu
$Z$	střední rozteč místních výstupků profilu
$t_p$	nosný podíl
$MP$	průměrná výška vrcholů
$MV$	průměrná hloubka prohlubní

##### Střední aritmetická odchylka profilu $MAD$

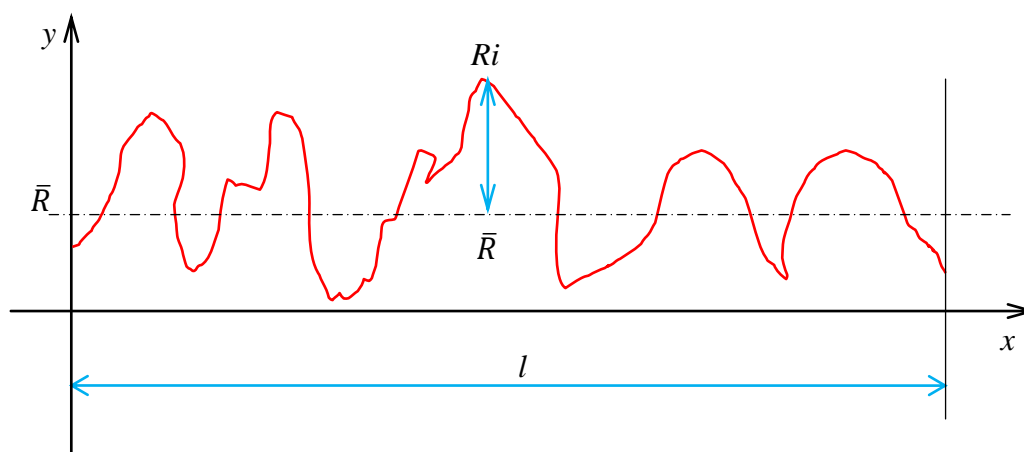
Střední aritmetická odchylka profilu je základní charakteristikou drsnosti povrchu. Jedná se o střední absolutní odchylku profilu na délce  $l$ , která je definovaná pro spojitý profil

$$MAD = \frac{1}{l} \int_0^l |R(x) - \bar{R}| dx, \quad (4)$$

nebo pro diskrétní profil

$$MAD \approx \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |R_i - \bar{R}|, \quad (5)$$

kde  $R(x)$  je výška profilu v místě  $x$ ,  $\bar{R}$  je průměrná hodnota výšky profilu,  $R_i$  je souřadnice profilu povrchu v mezích základní délky;  $i = 1, 2, 3, \dots, N$ ,  $l$  je délka profilu a  $N$  je počet bodů profilu povrchu na délce profilu. Na obr. 10 je zobrazena střední aritmetická odchylka profilu.



Obrázek 10 Střední aritmetická odchylka profilu.

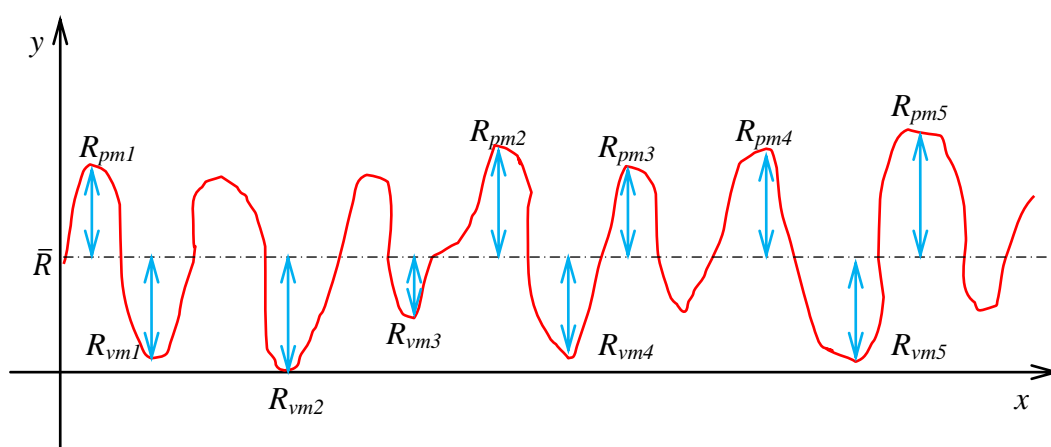
Charakteristika  $MAD$  ve své podstatě udává pouze střední hodnotu absolutních odchylek souřadnic jednotlivých bodů profilu zkoumaného povrchu od střední čáry profilu. Jedná se tedy o statistickou hodnotu. Tato charakteristika se využívá často pro kontrolu kvality, ale není dostačující pro popis profilů různých tvarů [10].

#### Výška nerovností profilu z deseti bodů $TP$ ( $S10z$ )

Výška nerovností profilu z deseti bodů je definována jako průměr z absolutních výšek pěti nejvyšších výstupků profilu a hloubek pěti nejnižších prohlubní profilu v rozsahu délky profilu

$$TP = \frac{\sum_{i=1}^5 |R_{pmi}| + \sum_{i=1}^5 R_{vmi}}{10}, \quad (6)$$

kde  $R_{pmi}$  je výška  $i$ -tého nejvyššího výstupku profilu a  $R_{vmi}$  je hloubka  $i$ -té nejhlubší prohlubně profilu. Na obrázku 11 je uvedena výška nerovností z deseti bodů.



Obrázek 11 Výška nerovností profilu z deseti bodů.

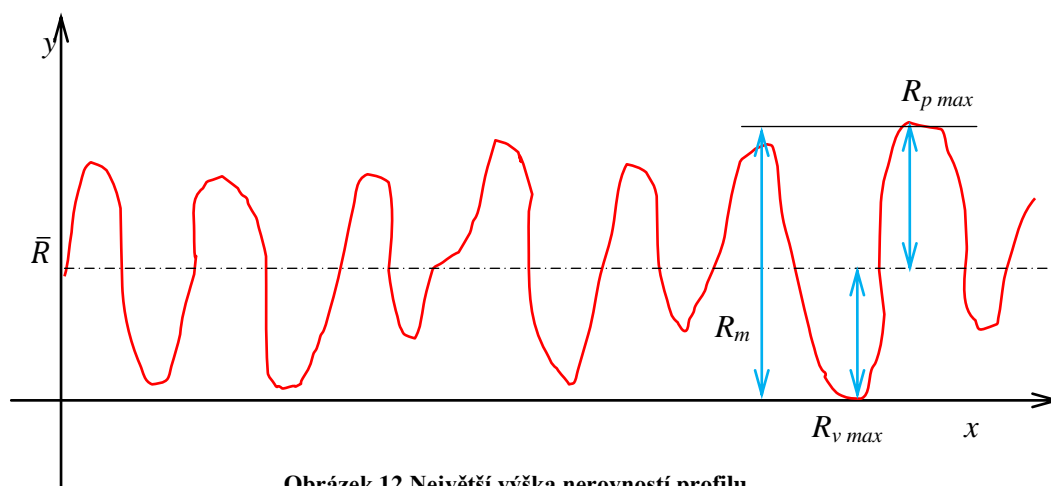
Parametr  $TP$  je definovaný jako průměrná odchylka mezi pěti nejvyššími hodnotami vrcholů a pěti nejnižšími hodnotami prohlubní uvnitř povrchového profilu. Tento parametr je citlivý na přítomnost vysokých hodnot vrcholů a nízkých hodnot prohlubní profilu. Často se používá za účelem kontroly kvality textilie [10].

### Největší výška nerovností profilu $R_m$

Největší výška nerovností profilu je výšková charakteristika drsnosti povrchu, určená vzdáleností mezi čarou výstupků profilu a čarou prohlubní profilu v rozsahu základní délky, tedy

$$R_m = R_{p \max} + R_{v \max}, \quad (7)$$

kde  $R_{p \max}$  je výška nejvyššího výstupku profilu a  $R_{v \max}$  je výška nejnižší prohlubně profilu [10]. Na obr. 12 je zobrazena největší výška nerovností profilu.



Obrázek 12 Největší výška nerovností profilu.

### **Střední rozteč nerovností profilů $Z_m$**

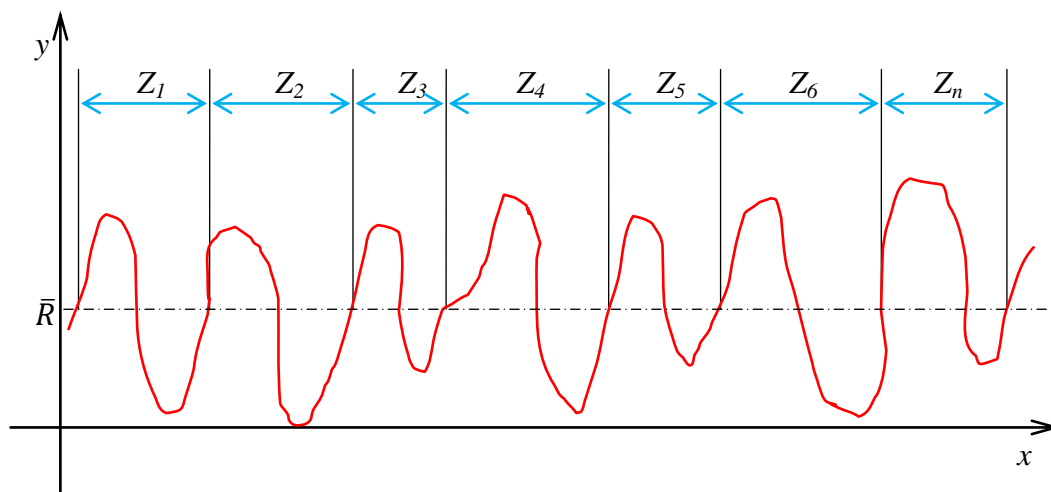
Střední rozteč nerovností profilů je charakteristikou drsnosti povrchu v podélném směru povrchu. Určuje se jako průměr roztečí nerovností profilu  $Z_{mi}$  v rozsahu základní délky

$$Z_m = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M Z_{mi} = \frac{2l_l}{k-1}, \quad (8)$$

kde  $l_l$  délka úseku na střední čáře profilu ( $l_l > 1$ ) ohraničená prvním a posledním lichým průsečíkem křivky profilu se střední čarou,  $k$  je počet průsečíků křivky profilu se střední čarou na délce měřeného úseku a  $M$  je počet roztečí na střední čáře profilu. Na obrázku 13 je znázorněna střední rozteč nerovností profilů.

Střední rozteč nerovností profilu slouží pro délkové (frekvenční) hodnocení drsnosti povrchu, zvláště pro zhodnocení základní periodické složky profilu povrchu [10].





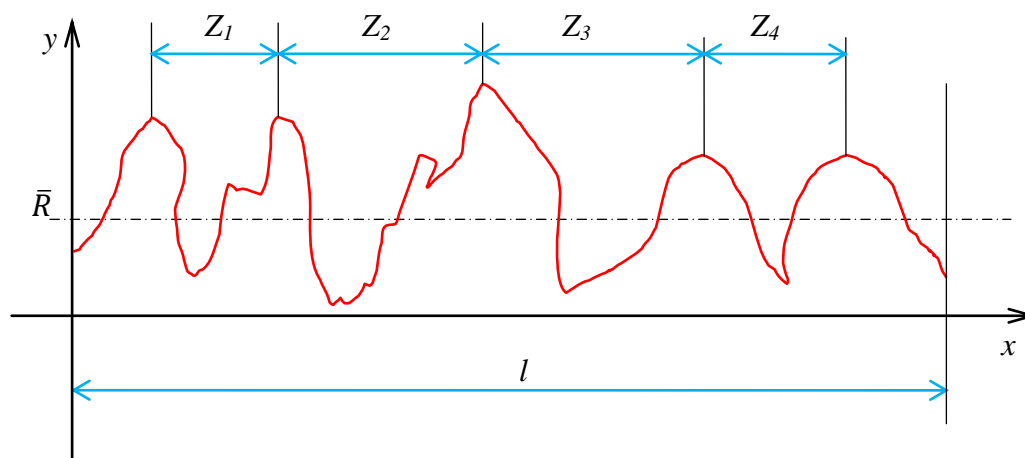
Obrázek 13 Střední rozteč nerovností profilů.

### Střední rozteč místních výstupků $Z$

Střední rozteč místních výstupků je také charakteristikou drsnosti povrchu v podélném směru profilu. Určuje se jako průměr roztečí místních výstupků ležících v rozsahu základní délky

$$Z = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M Z_i = \frac{l}{Q - 1}, \quad (9)$$

kde  $Z_i$  je rozteč místních výstupků, resp. délka úseku střední čáry profilu mezi průmětem dvou nejvyšších bodů sousedních místních výstupků profilu,  $M$  je počet roztečí na střední čáře profilu,  $Q$  je počet nejvyšších bodů místních výstupků profilu v rozmezí délky profilu  $l$  [10]. Na obrázku 14 jsou zobrazeny střední rozteče místních výstupků.



Obrázek 14 Střední rozteč místních výstupků.

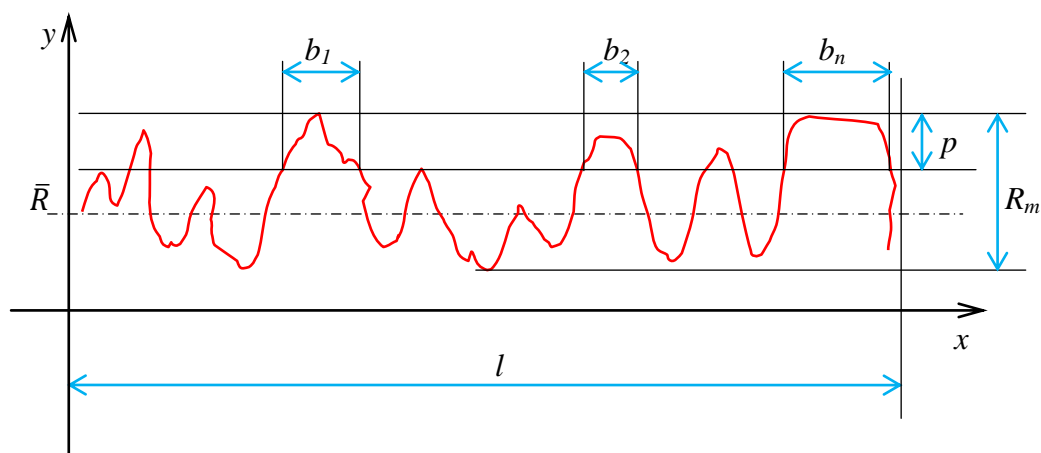
Podobně jako střední rozteč nerovností profilu slouží i střední rozteč místních výstupků pro délkové (frekvenční) hodnocení drsnosti povrchu, zvláště pak pro zhodnocení náhodné složky profilu povrchu.

### Nosný podíl $t_p$

Nosný podíl je tvarovou charakteristikou profilu. Tato charakteristika je definována jako poměr nosné délky profilu k základní délce

$$t_p = \frac{l_p}{l}, \quad (10)$$

kde  $l$  je základní délka profilu,  $l_p$  je délka povrchové křivky profilu,  $p$  index určuje polohu řezu profilu, který se vyjadřuje podílem z  $R_m$  [%]. Je to součet délek úseků  $b$  vytvořených v určité poloze řezu materiálu čarou profilu, ekvidistantní se střední čarou profilu v rozsahu základní délky [10]. Na obr. 15 je zobrazený nosný podíl.

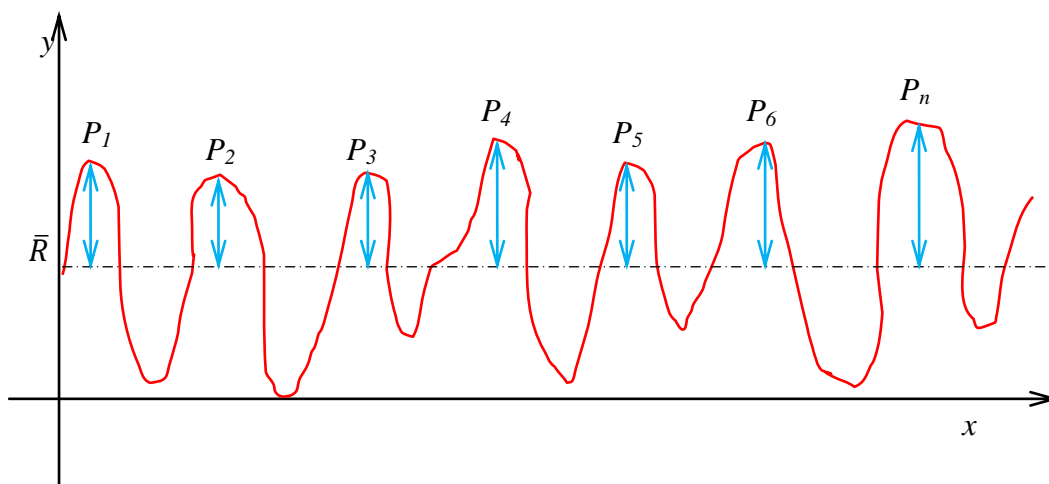


Obrázek 15 Nosný podíl.

### Průměrná výška vrcholů $MP$

Průměrná výška vrcholů  $MP$  je definována jako průměrná odchylka profilu nad referenční hodnotou  $R$ . Pro hodnoty vrcholů  $P_i$ ,  $i = 1, \dots, N_p$  (počet vrcholů) platí

$$P_i = R_i - R \text{ pro } R_i - R > 0 \text{ a } P_i = 0 \text{ jinde}$$

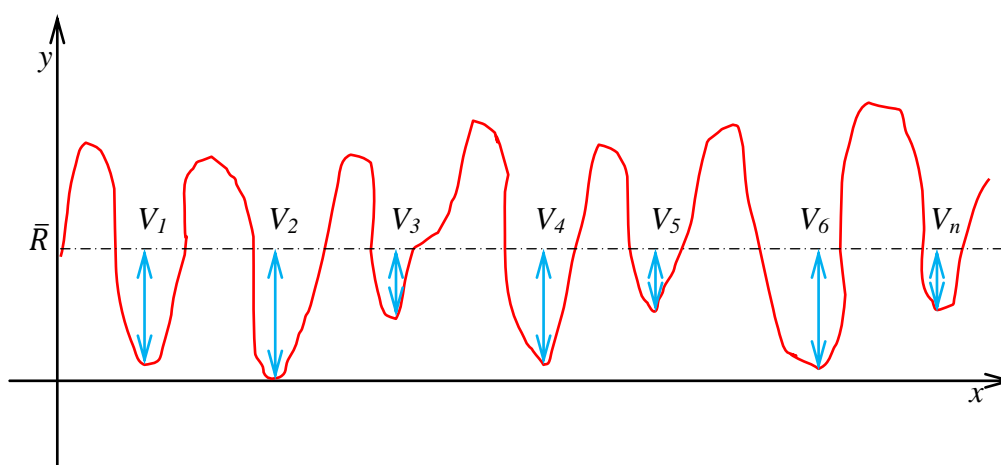


Obrázek 16 Průměrná výška vrcholů.

### Průměrná hloubka prohlubní $MV$

Průměrná hloubka prohlubní profilu  $MV$  je definována jako průměrná odchylka profilu pod referenční hodnotou  $R$  (často se volí  $R = \bar{R}$ ). Pro hodnoty prohlubní  $V_i$ ,  $i = 1, \dots, N_v$  (počet prohlubní) platí

$$V_i = R_i - R \text{ pro } R_i - R > 0 \text{ a } V_i = 0 \text{ jinde}$$



Obrázek 17 Průměrná výška prohlubní.

Parametry  $MP$  a  $MV$  poskytují informace o komplexitě profilu povrchu, zejména pro účely tribologie [10].

## 4.2 Nenormalizované charakteristiky drsnosti povrchu

Charakteristiky uvedené v normách v předchozí kapitole neumožňují vytvořit si představu o tom, jak funkční povrch vlastně vypadá. Proto je potřeba pro detailnější popis drsnosti povrchu provést přesnější analýzu mikrogeometrických charakteristik profilu povrchu. Tyto charakteristiky nejsou zahrnuty v normách, ale používají se pro detailnější popis povrchu.

Nenormalizované charakteristiky drsnosti povrchu jsou

<i>SD</i>	střední kvadratická odchylka profilu
<i>CV</i>	variační koeficient výšky profilu
<i>PSC</i>	průměrný čtverec směrnice profilu
<i>PC</i>	průměrná křivost profilu
<i>MS</i>	průměrná směrnice profilu

### Střední kvadratická odchylka profilu *SD*

V rozsahu své délky  $l$  je určena vztahem pro spojitý profil jako

$$SD = \sqrt{\frac{1}{l} \int_0^1 (R(x) - \bar{R})^2 dx}, \quad (11)$$

nebo pro diskrétní profil jako

$$SD \approx \sqrt{\frac{1}{l} \sum_{i=1}^N (R_i - \bar{R})^2}, \quad (12)$$

kde  $l$  je délka profilu a  $N$  je počet bodů na délce profilu.

Střední kvadratická odchylka profilu  $SD$  je současně směrodatnou odchylkou jednotlivých bodů profilu povrchu. Stejně jako  $MAD$ , tak se hodnota  $SD$  používá zejména pro výškové (amplitudové) hodnocení profilu povrchu.

Výhodou parametru  $SD$  oproti  $MAD$  je snadná konstrukce intervalů spolehlivosti a provádění statistických testů pro normálně rozdělená data. Hodnota  $SD$  je vždy vyšší než hodnota  $MAD$  a pro normálně rozdělená data platí  $SD = 1,25 * MAD$ . Samotný parametr  $SD$  rozhodně není dostačující pro definování profilů různých tvarů [10].

### **Variační koeficient výšky profilu $CV$**

Související bezrozměrnou charakteristickou je variační koeficient výšky profilu  $CV$ , jenž je používanou charakteristikou variability povrchu a má tvar

$$CV = \frac{SD}{MAD}. \quad (13)$$

Jeho statistické chování je známe pro případ, kdy data  $R_i$  jsou nezávislá a mají normální rozdělení [10].

### **Průměrný čtverec směrnice profilu $PSC$**

Je definován jako

$$PSC = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_i \left( \frac{dR(x)}{dx^2} \right)_i^2}. \quad (14)$$

### **Průměrná křivost profilu $PC$**

Průměrná křivost profilu je definována jako

$$PC = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_i \left( \frac{d^2 R(x)}{dx^2} \right)_i^2}. \quad (15)$$

Směrnice a křivost profilu jsou parametry charakterizující tvar profilu, také jsou významné pro tribologické aplikace a pro rozptyl záření [10].

### **Průměrná směrnice profilu $MS$**

Průměrná směrnice profilu je daná vztahem

$$MS = \frac{1}{N} \sum_i \left| \frac{dR(x)}{dx} \right|_i. \quad (16)$$

Tento parametr je důležitý v aplikacích např. sledování smykového tření a reflexe světla od povrchu, resp. opotřebení. Nižší hodnota směrnice znamená tření a s ním související opotřebení součásti [10].

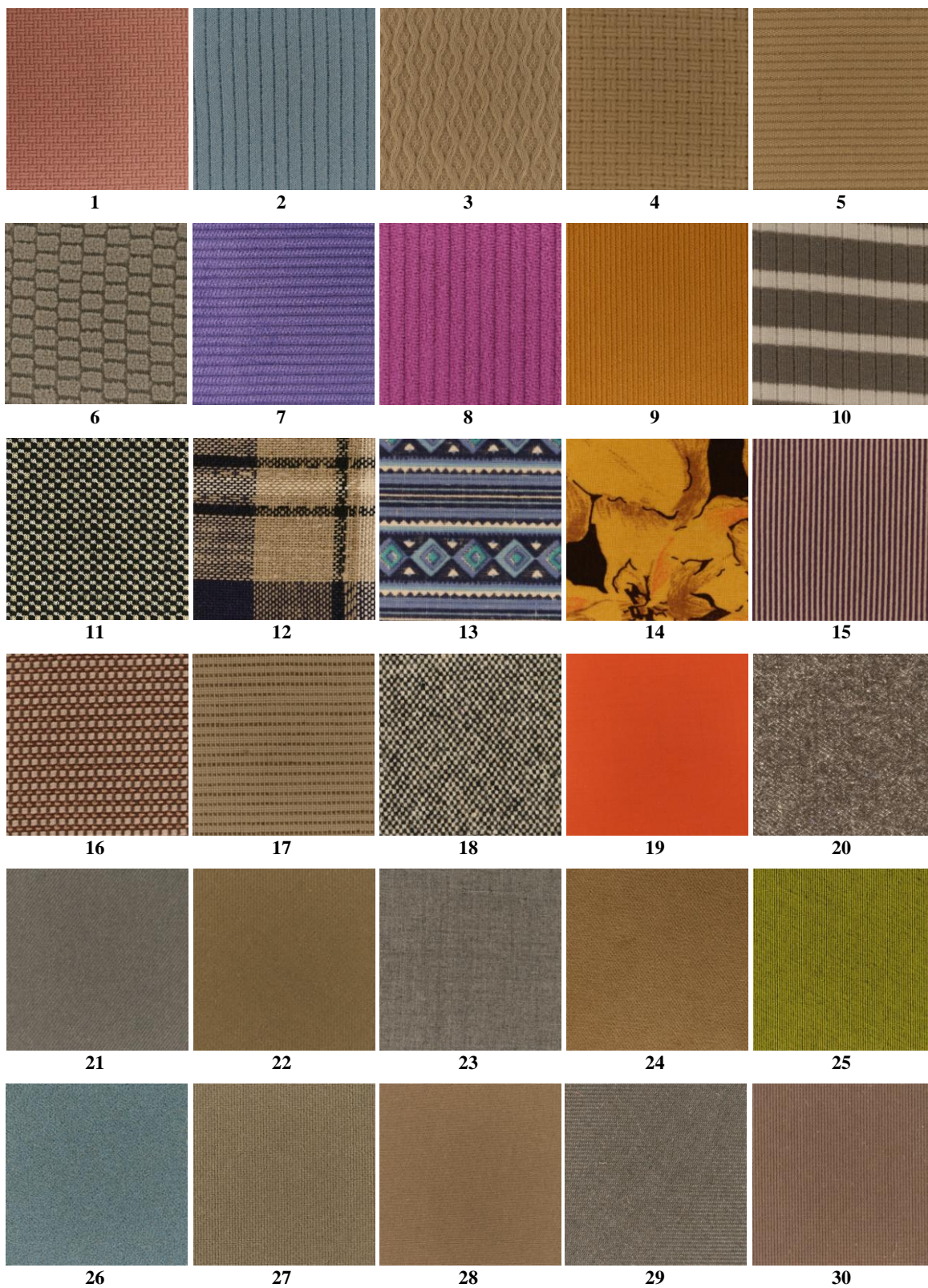
## EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

### 5 Návrh objektivní metody pro měření drsnosti povrchu textilie

V teoretické části byly shrnuty různé způsoby hodnocení drsnosti povrchu textilie. Cílem této práce je navrhnout efektivní metodu pro hodnocení drsnosti povrchu textilie, která nebude časově ani přístrojově náročná. Nejdůležitější částí metody je 3D rekonstrukce povrchu textilie. Ta je realizována v této práci pomocí metody gradientních polí. Z jednotlivých profilů 3D povrchu textilie jsou pak počítány základní povrchové charakteristiky. Pro zjištění hodnot celého 3D povrchu pak byly naměřené hodnoty jednotlivých profilů zprůměrovány. Algoritmus pro hodnocení drsnosti povrchu textilie byl navržen v programu MATLAB za využití knihoven *Image Processing Toolbox*. Výsledky metody jsou pro zjištění její přesnosti dále porovnány s výsledky dalších dvou metod - kontaktní a bezkontaktní.

#### 5.1 Obrazová sada vzorků

Pro objektivní hodnocení drsnosti povrchu textilie na základě navržené metodiky byla vybrána reprezentativní sada 30 vzorků. Sada vzorků byla vybrána tak, aby zahrnovala jak vzorky s výraznou strukturou povrchu, tak i vzorky s hladším povrchem, ale i vzorky jednobarevné a vzorované. Různorodé vzorky v reprezentativní sadě byly vybrány za účelem ověření efektivnosti navržené metody na odlišných typech textilií. Vzorky textilií 1 - 30 jsou zobrazeny na obr. 18. Vzorky se liší v materiálu, ve vzoru, v typu vazby, dostavě a v plošné hmotnosti. Bližší specifikace reprezentativní sady vzorků je uvedena v tabulce 1.



Obrázek 18 Obrazová sada vzorků 1-30.



**Tabulka 1** Specifikace reprezentativní sady vzorků.

<b>Vzorek</b>	<b>Typ</b>	<b>Vazba</b>	<b>Dostava osnovy [cm-1] / Počet oček</b>	<b>Dostava útku [cm-1] /Počet řádků</b>	<b>Plošná hmotnost [g/m2]</b>
1	Tkanina	Plátno	38	38	249
2	Pletenina	Oboulícní	11	11	284
3	Tkanina	Třívazný kepr	72	26	223
4	Tkanina	Plátno	15	15	312
5	Tkanina	Plátno	24	24	261
6	Pletenina	Oboulícní	12	11	297
7	Tkanina	Plátno	23	26	336
8	Tkanina	Plátno	18	30	375
9	Tkanina	Plátno	42	21	266
10	Pletenina	Oboulícní	10	16	147
11	Pletenina	Oboulícní	9	14	505
12	Tkanina	Plátno	10	8	227
13	Tkanina	Plátno	18	17	124
14	Tkanina	Plátno	20	20	114
15	Tkanina	Víceřádkový kepr	53	43	124
16	Tkanina	Plátno	12	12	392
17	Tkanina	Plátno	24	12	190
18	Tkanina	Plátno	12	16	364
19	Tkanina	Plátno	34	40	68
20	Tkanina	Třívazný kepr	17	17	525
21	Tkanina	Třívazný kepr	23	23	322
22	Tkanina	Třívazný kepr	24	27	228
23	Tkanina	Plátno	20	20	207
24	Tkanina	Atlas	25	17	297
25	Tkanina	Třívazný kepr	23	43	231
26	Tkanina	Třívazný kepr	22	22	190
27	Tkanina	Plátno	60	65	229
28	Pletenina	Oboulícní	15	20	149
29	Tkanina	Třívazný kepr	18	16	196
30	Tkanina	Plátno	49	47	184

## 5.2 Princip snímání povrchu vzorků

Pro možnost použití metody gradientních polí bylo zapotřebí vytvořit gradient povrchu pomocí šikmého osvětlení. Proto byl každý vzorek postupně šikmo osvětlen ze 4 stran a při jednotlivém osvětlení byl povrch vzorku vždy nasnímán. Tímto způsobem vznikla pro každý vzorek sada čtyř obrazů. Obrazy byly pořízeny fotoaparátem značky Canon EOS 400D Digital s objektivem Canon Macro Lens EF 100 mm 1:2:8 USM. Vzorky byly umístěny na střed podložky, na které byly připevněny čtyři světelné zdroje rozptylového typu o velikosti 160 x 69 mm s několika řadami LED pásků uvnitř osvětlení s příkonem 36W/3A/1m a vyzařované teplotě 3700 - 4200K (neutrální bílá) se světelným tokem 2200 Lm/1m pod úhlem 120°. Tato světla byla umístěna ve vzdálenosti 15 cm od středu vzorku, ve výšce 7 cm a pod úhlem 45° vzhledem k podložce. Fotoaparát byl umístěn na stativu ve výšce přibližně 58 cm kolmo k podložce. Parametry nastavení fotoaparátu byly následující: ohnisková vzdálenost 100 mm, doba expozice 1/8, ISO 200. Světla byla umístěna tak, aby mezi sebou svírala úhel 90° pro zachování identických podmínek snímání. Na obr. 19 (a) je zobrazen snímací systém a (b) ukázka speciálního světelného systému, který byl využit pro osvětlení vzorku během snímání jeho povrchu. Snímání obrazů probíhalo v temné místnosti z důvodu dodržení stejných světelných podmínek.

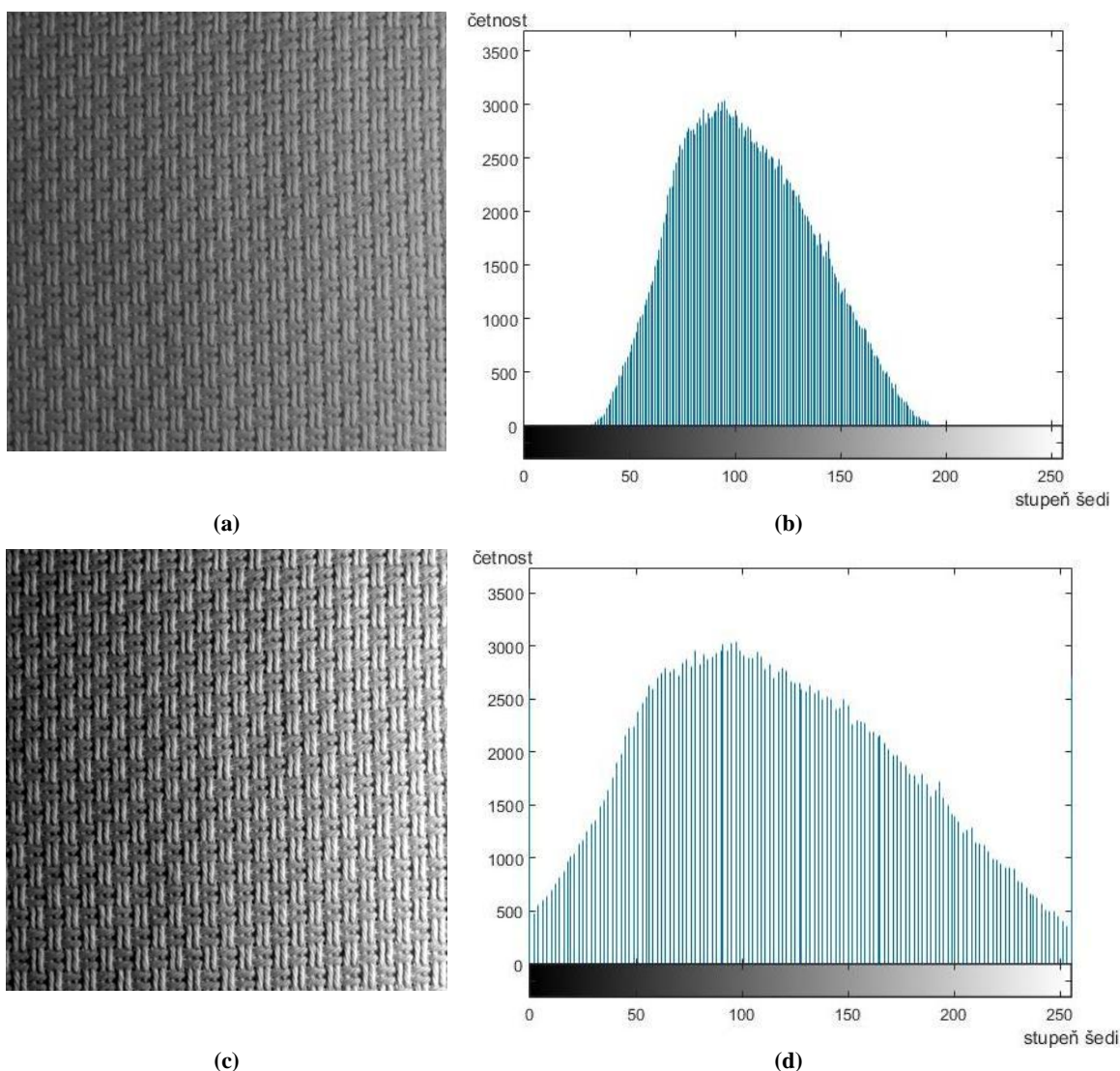


Obrázek 19 (a) Reálný snímací systém obrazu a (b) speciální světelný systém.

### 5.3 Předzpracování obrazů vzorků textilií

Po nasnímání sady čtyř obrazů pro každý vzorek bylo třeba obrazy vzorků před 3D rekonstrukcí povrchů předzpracovat. Každý obraz byl oříznut z původních 3888 x 2592 pixelů (12,5 x 8,35 cm) na 2000 x 2000 pixelů (6,5 x 6,5 cm). Dalším krokem bylo převedení barevných obrazů na obrazy šedotónové použitím funkce *rgb2gray.m*.

Pomocí funkce *imadjust.m* byl upraven kontrast obrazu. Funkce přiřadí 1 % hodnot, které mají minimální intenzitu jasu obrazu, hodnotu 0 a 1 % hodnot s maximální intenzitou jasu přiřadí hodnotu 255. Zbytek hodnot jasu obrazu lineárně interpoluje přes celou stupnici šedi. Touto úpravou se zvýšil kontrast obrazu. Na obr. 20 (a) - (d) je zobrazen původní obraz vzorku 1, jeho histogram, dále obraz vzorku po zvýšení kontrastu a jeho histogram.



Obrázek 20 Jasové transformace obrazu vzorku 1; (a) původní šedotónový obraz textilie vzorku, (b) histogram šedotónového obrazu, (c) obraz po zvýšení kontrastu (d) histogram upraveného obrazu.

## 5.4 3D rekonstrukce povrchu vzorků

Po zvýšení kontrastu obrazu jednotlivých vzorků následovala 3D rekonstrukce povrchu. 3D rekonstrukce povrchu je založena na metodě gradientních polí, jež vychází z práce autorů [14], kteří se zabývali blíže danou metodou. Metoda gradientních polí je založena na vzniklém stínu, vytvořený šikmým osvětlením textile ze čtyř stran. Gradient obrazu se všeobecně vypočítá derivací obrazu ve směru osy  $x$  a  $y$ . V praxi bývají gradientní pole nulová a neintegrovatelná. K zjištění hodnot je potřeba zajistit jejich integrovatelnost pomocí jednotlivých funkcí. Pokud byla zajištěna integrovatelnost těchto hodnot, je možné vytvořit rekonstruovaný 3D povrch. Ze získaných hodnot gradientních polí se vytvoří 3D rekonstrukce povrchu pomocí Frankot - Chellappova algoritmu, který byl převzat z práce [14]. V této práci byl použit Frankot - Chellappův algoritmus pro rekonstrukci, který se snaží, aby gradientní pole bylo integrovatelné. Pokud je integrovatelné, pak lze získaný povrch zobrazit ve 3D. Celý matematický postup pro získání integrovatelnosti gradientní pole je blíže popsán v práci [14].

Po nasnímání sady čtyř obrazů a jejich předzpracování následuje odhad dvou gradientních obrazů - gradient  $g_x$  ve směru osy  $x$  a gradient  $g_y$  ve směru osy  $y$ . Odhady dvou gradientních obrazů byly získány odečtením obrazu  $I_a$  textile osvětlené zleva od obrazu  $I_b$  textile osvětlené zprava pro gradient  $g_x$  ve směru osy  $x$  dle vztahu (17) a odečtením obrazu  $I_c$  osvětleného shora od obrazu  $I_d$  osvětleného zdola pro gradient  $g_y$  ve směru osy  $y$  dle vztahu (18). Šikmým nasvícením vzorků vznikne stín, který je pro většinu metod nevýhodou, ale u této metody je žádoucím a důležitým faktorem. Autoři práce [14] testovali metodu na různých předmětech jako je váza, socha apod. Efektivita 3D rekonstrukce na základě metody gradientních polí byla v této práci nejprve testována na vybraném předmětu - minci. Na obrázku 21 (a) - (g) je uvedena sada čtyř obrazů mince šikmo nasvícené, dále gradientní obrazy ve směru osy  $x$  a  $y$  a zrekonstruovaný 3D povrch mince.

$$g_x = I_a - I_b, \quad (17)$$

$$g_y = I_c - I_d. \quad (18)$$



(a)



(b)



(c)



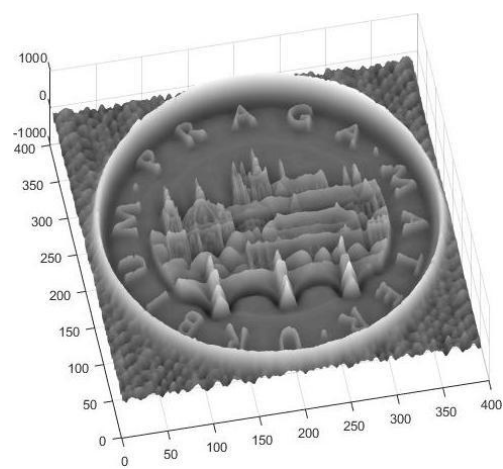
(d)



(e)



(f)

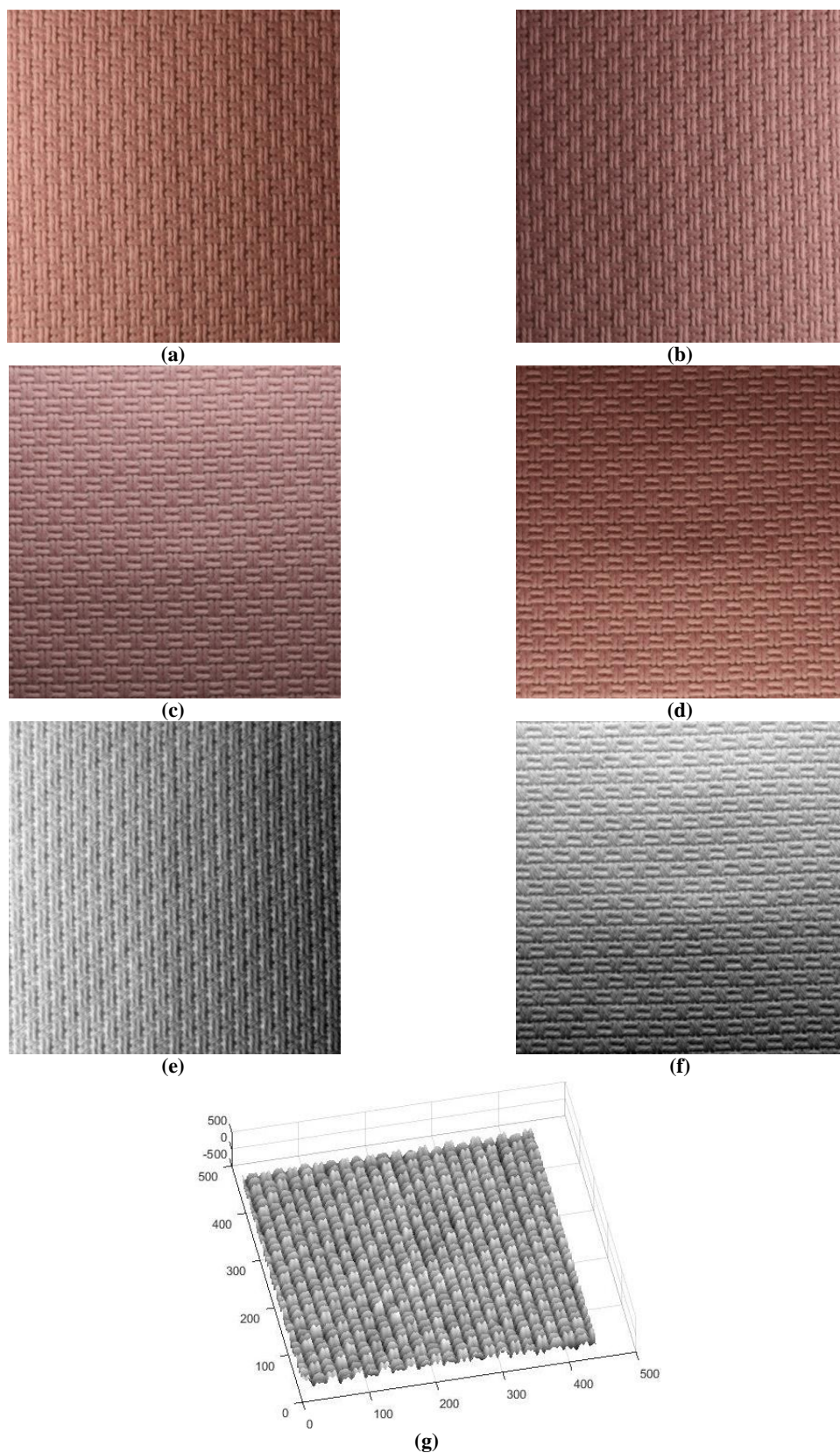


(g)

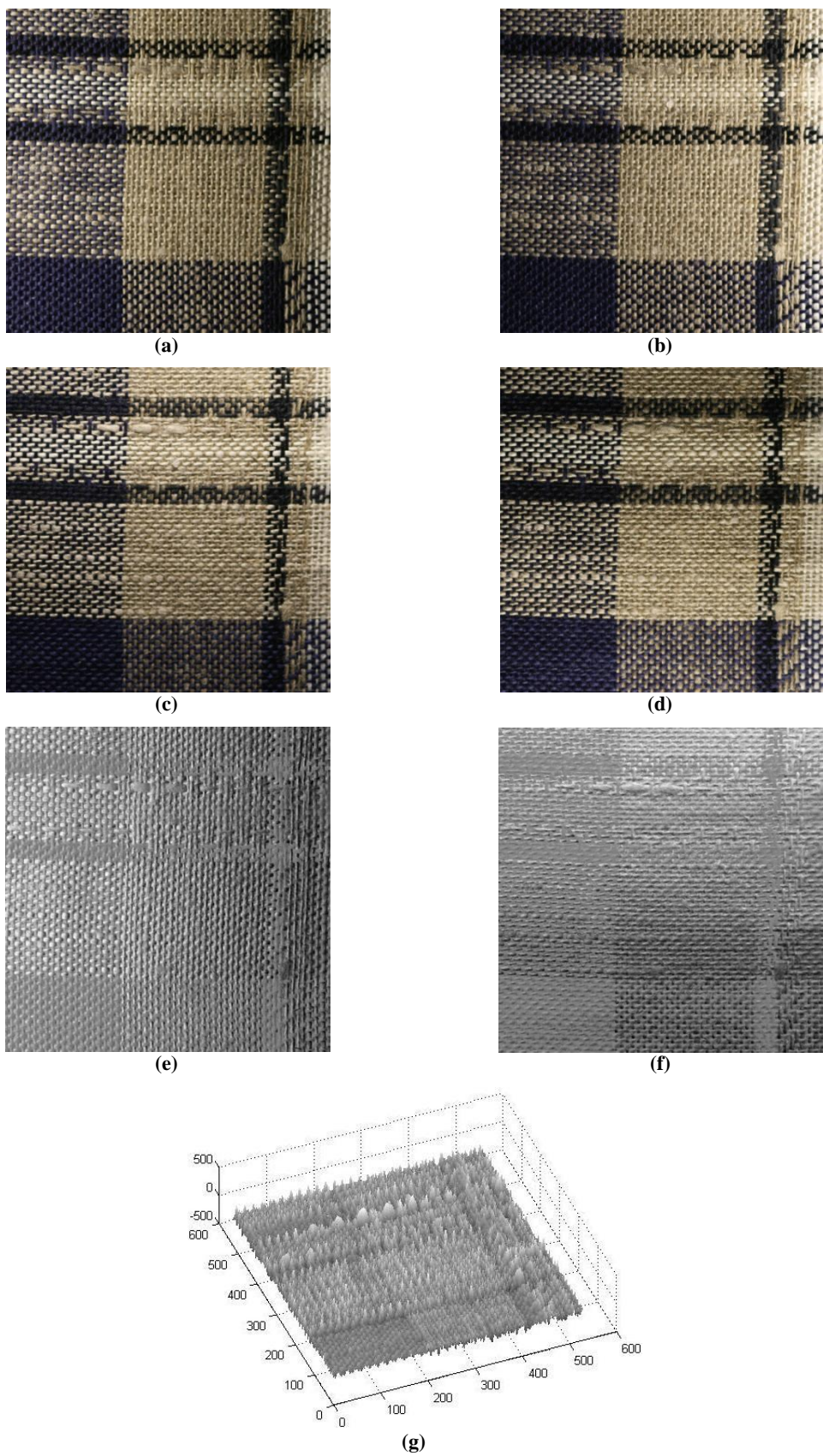
Obrázek 21 a) levé, (b) pravé, (c) horní, (d) spodní nasvícení mince, (e) gradientní obraz nasvícený zleva odečtený od obrazu nasvíceného zprava, (f) gradientní obraz nasvícený ze shora odečtený od obrazu nasvíceného zdola, (g) rekonstruovaný 3D povrch vzorku.

3D rekonstrukce mince se ukázala jako poměrně přesná, proto byla metoda dále aplikována na rekonstrukci povrchu reprezentativní sady vzorků. Na obrázku 21 (a) - (g) je uvedena sada čtyř obrazů vzorku 1, který je šikmo osvětlen zleva, zprava, shora a zespodu, dále gradientní obraz ve směru  $x$  a  $y$  a zrekonstruovaný povrch 3D vzorku.





**Obrázek 22 (a) levé, (b) pravé, (c) horní, (d) spodní nasvícení vzorku 12, (e) gradientní obraz nasvícený zleva odečtený od obrazu nasvíceného zprava, (f) gradientní obraz nasvícený ze shora odečtený od obrazu nasvíceného zdola, (g) rekonstruovaný 3D povrch vzorku.**



Obrázek 23 (a) levé, (b) pravé, (c) horní, (d) spodní nasvícení vzorku 12, (e) gradientní obraz nasvícený zleva odečtený od obrazu nasvíceného zprava, (f) gradientní obraz nasvícený ze shora odečtený od obrazu nasvíceného zdola, (g) rekonstruovaný 3D povrch vzorku.

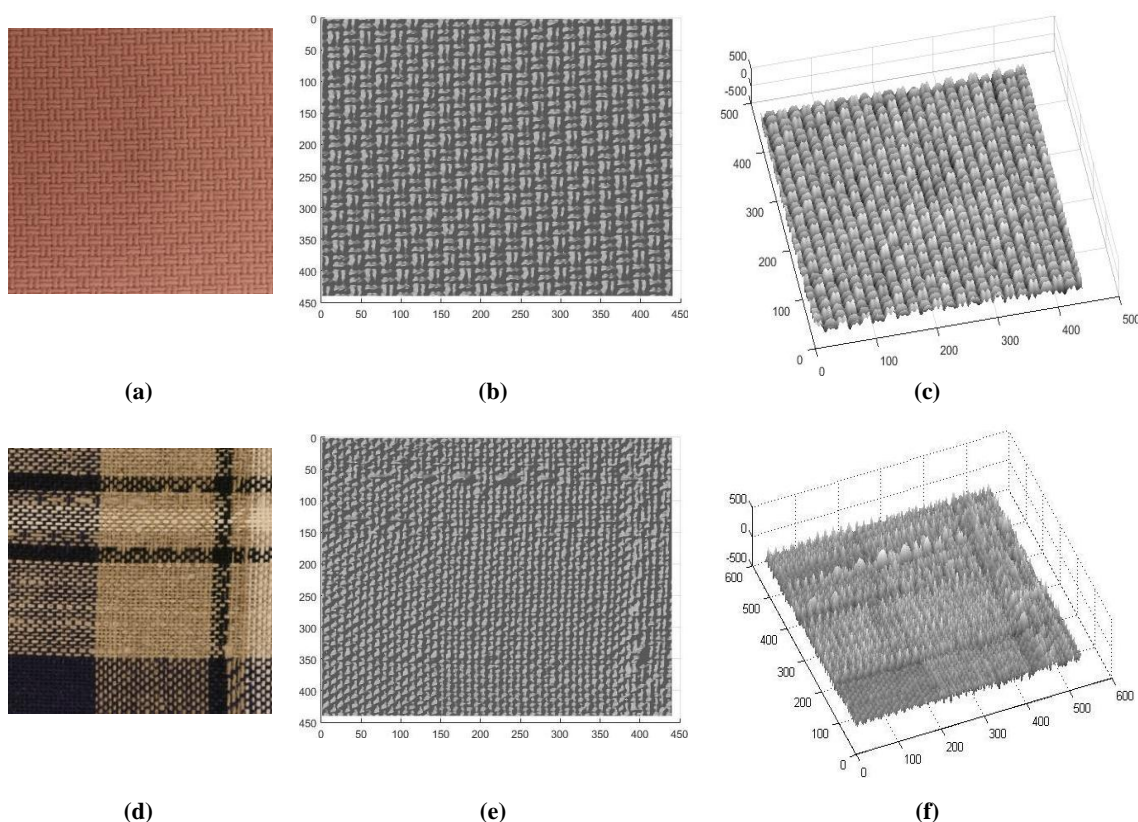


## 5.5 Zpracování 3D povrchu

Po rekonstrukci 3D povrchu vzorku pomocí Frankot - Chellappova algoritmu je potřeba eliminovat ještě šum, který vznikl při 3D rekonstrukci povrchu. Šum je u této metody nežádoucí, protože snižuje její přesnost. V této práci byl použit Gaussův filtr pro odstranění šumu. Pomocí filtrace se všeobecně vypočítají nové hodnoty pixelů v rozsahu velikosti masky filtru. Funkcí *fspecial.m* byl vygenerován filtr daného typu a byl zvolen Gaussův filtr, protože byl pro tento typ obrazu nejvhodnější. 2D Gaussův filtr je definován dle vztahu

$$h_g(n_1, n_1) = e^{\frac{-(r_1^2 + r_2^2)}{2\sigma^2}}, \quad (19)$$

kde  $h$  je velikost masky,  $\sigma$  je směrodatná odchylka a  $r_1, r_2$  jsou souřadnice pixelů. Výstupem funkce *fspecial.m* je matice, ve které je definován zvolený filtr. Pomocí funkce *imfilter.m* se filtr aplikuje na obraz s daným parametrem, který byl vytvořen v předchozím kroku. Na obrázku 24 (a) - (f) jsou zobrazeny vzorky 1 a 12, jejich povrch před filtrací a rekonstruovaný 3D povrch.



Obrázek 24 (a) barevný obraz vzorku 1, (b) jeho 3D povrch před filtrací, (c) rekonstruovaný 3D povrch vzorku 1, (d) barevný obraz vzorku 12, (e) jeho 3D povrch před filtrací a (f) rekonstruovaný 3D povrch vzorku 12

## 5.6 Extrakce jednotlivých charakteristik z 3D povrchu vzorků

Jedním z hlavních cílů této práce byl výpočet povrchových charakteristik vzorků textilie. Charakteristiky drsnosti povrchu slouží pro jeho popis. Bližší popis všech charakteristik je v kapitole 4. V práci byly použity následující povrchové charakteristiky dle norem ČSN EN ISO 25178, EUR 15178N a ČSN EN ISO 12781 pro měření drsnosti povrchu:

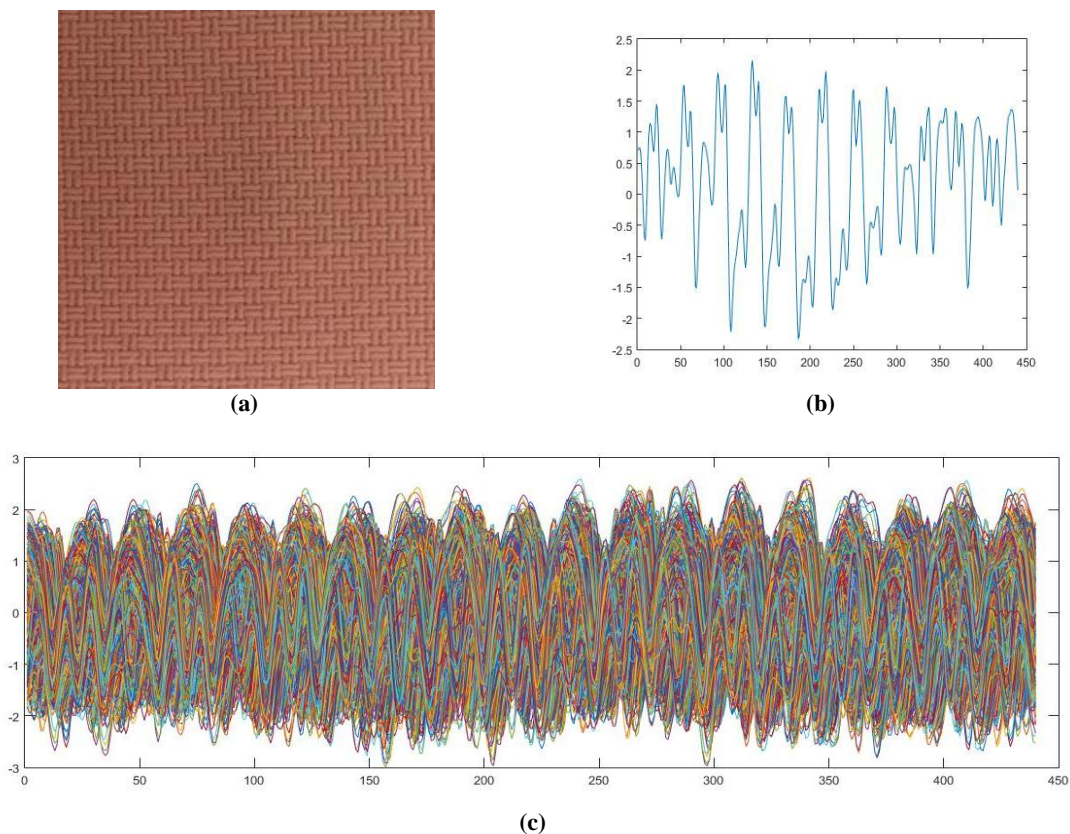
- normalizované charakteristiky

$MAD$	střední aritmetická odchylka profilu
$Sp$	maximální vrchol profilu
$Sv$	maximální prohlubeň profilu
$S5p$	výška pěti největších vrcholů
$S5v$	výška pěti největších prohlubní
$S10z$	výška nerovností počítána z deseti hodnot profilu
$R_m$	největší výška nerovností profil
$Z_m$	střední rozteč nerovností profilu
$Z$	střední rozteč místních výstupků profilu
$t_p$	nosný podíl
$MP$	průměrná výška vrcholů
$MV$	průměrná hloubka prohlubní

- nenormalizované charakteristiky - detailnější popis drsnosti povrchu textilie

$SD$	střední kvadratická odchylka profilu
$CV$	variační koeficient výšky profilu
$PSC$	průměrný čtverec směrnice profilu
$PC$	průměrná křivost profilu
$MS$	průměrná směrnice profilu

Z jednotlivých profilů povrchu byly počítány zmíněné charakteristiky. Výsledná hodnota charakteristik představovala průměrnou hodnotu z hodnot získaných z jednotlivých profilů povrchu. Tyto charakteristiky byly počítány pomocí vytvořeného algoritmu v MATLABU. Algoritmus byl navrhnut tak, že všechny povrchové charakteristiky byly počítány jenom po osnově a to jak u navrhované metody, tak i u obou metod, se kterými byla navrhovaná metoda porovnávána. Na obrázku 24 (a) - (c) je znázorněn barevný obraz vzorku 1, jeho náhodný profil a graf se všemi jeho profily.



Obrázek 25 (a) vzorek 1 (b) náhodný profil vzorku 1, (c) celkový profil vzorku 1.

Z důvodu neznámé výšky povrchů jednotlivých vzorků byly hodnoty původního obrazu převedené na normované normální rozdělení podle obecného vztahu [15]

$$T = \frac{U - \mu}{\sigma}, \quad (20)$$

kde  $U$  je náhodná veličina,  $\mu$  je střední hodnota a  $\sigma$  je směrodatná odchylka. V této práci je použita normalizace dat v tomto vztahu

$$T = \frac{x_0 - \mu}{\sigma}, \quad (21)$$

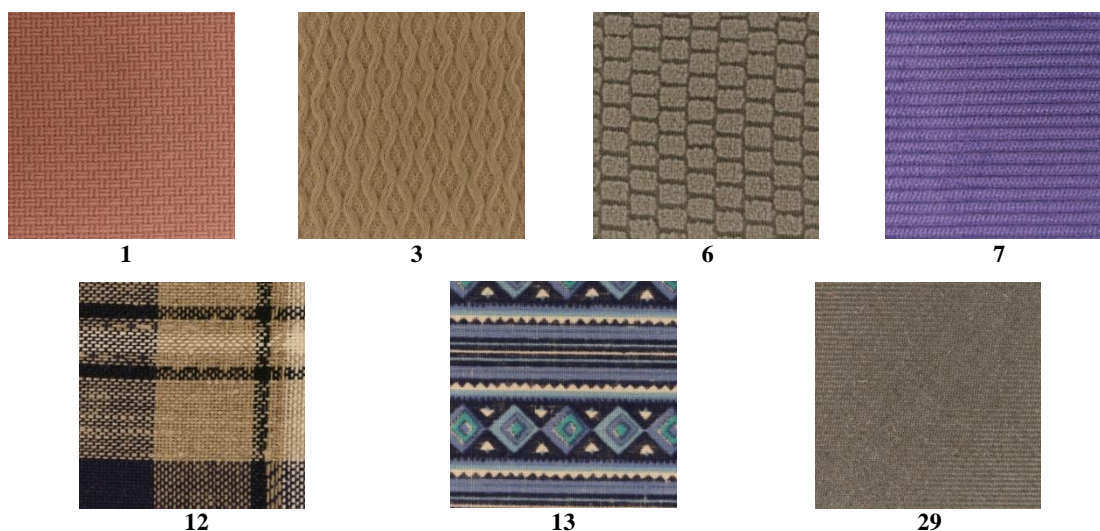
kde  $x_0$  představuje bod profilu,  $\mu$  je střední hodnota odstínu šedi celého obrazu a  $\sigma$  je směrodatná odchylka odstínu šedi obrazu. Z důvodu normalizace obrazových dat jsou všechny naměřené hodnoty charakteristik bezrozměrné. Charakteristika  $SD$  - střední kvadratická odchylka profilu z důvodu normalizace dat vychází vždy 1, a proto byla z porovnání metod vyřazena. V tabulce 2 jsou uvedeny naměřené hodnoty navrhovanou metodou vzorku 1, který patří mezi jednobarevné vzorky a vzorku 12, který patří mezi vzorované textilie.

**Tabulka 2** Hodnoty naměřené navrhovanou metodou.

	<b>vzorek 1</b>	<b>vzorek 12</b>
MAD	0,8443	0,7822
Sp	2,6155	4,2359
Sv	1,6057	1,0847
S5p	2,5979	4,1249
S5v	-0,4932	-0,4254
S10z	2,1046	3,6995
Rm	4,2213	5,3207
Šikmost	-0,0706	0,1911
Špičatost	2,1906	3,2847
Zm	21,197	11,7261
CV	1,1843	1,2783
Z	13,050	9,9040
tp	0,4932	0,4820
MP	1,0708	1,0008
MV	-1,1029	-0,9992
PSC	0,3054	0,4540
PC	0,1740	0,3342
MS	0,2456	0,3760

## 6 Porovnání navrhované metody s ostatními metodami

Pro zjištění přesnosti navrhované metody byly její výsledky porovnány s dalšími metodami pro měření drsnosti povrchu textilie. Mezi vybrané metody pro testování efektivnosti navržené metody patřil systém KES, který je zde zástupcem kontaktních metod, a přístroj Talysurf, který představuje bezkontaktní metodu snímání povrchu. Navrhovaná metoda byla porovnána jak s kontaktní, tak i bezkontaktní metodou. Za účelem porovnání navrhované metody se zmíněnými metodami bylo z reprezentativní sady vybráno sedm vzorků (celá reprezentativní sada vzorků je zobrazena na obr. 18 v kapitole 5.1). Vybrané vzorky se lišily ve vzoru, barvě, dostavě, materiálovém složení tak, aby se zajistila co největší různorodost pro testování efektivnosti metody. Mezi vybrané vzorky patří vzorky 1, 3, 6, 7, 29, 12, 13. Vzorky 1, 3, 6, 7 a 29 patří mezi jednobarevné vzorky a vzorky 12 a 13 patří mezi vzorované vzorky. Bylo vybráno sedm vzorků, protože systém KES je velmi frekventovaně využíván. I tak bylo systémem KES naměřeno sedm vzorků, místo obvyklých čtyř. Na obr. 25 jsou uvedené vybrané reprezentativní vzorky. Jednotlivé metody měří odlišnou plochu či úseky textilie, ale to by nemělo mít vliv na naměřené výsledky. V následující části jsou uvedeny detaily snímání povrchu vzorků v rámci vybraných metod pro porovnání efektivnosti navržené metody.

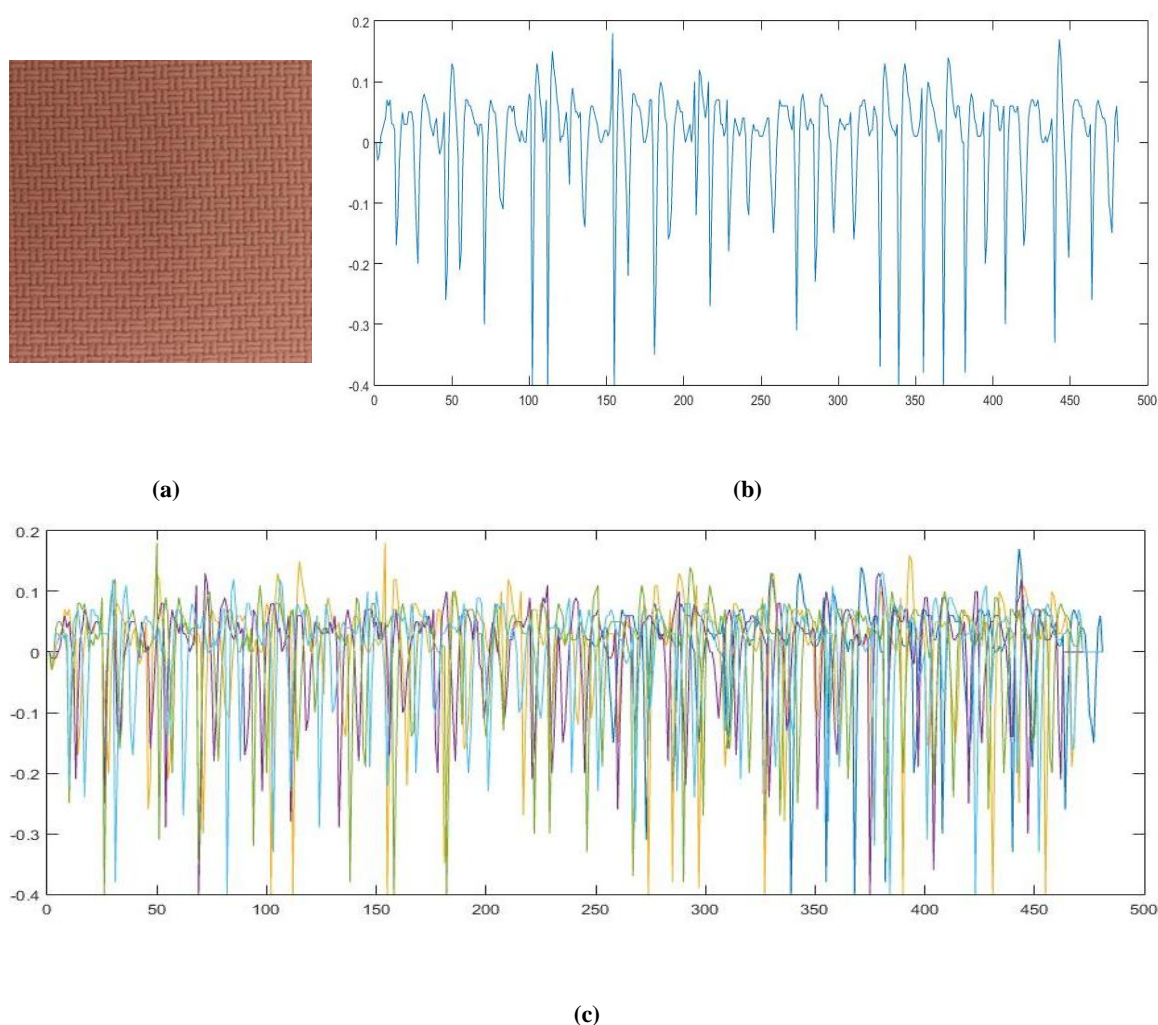


Obrázek 26 Vybraná sada vzorků pro porovnání efektivty testovaných metod



## 6.1 KES - kontaktní metoda měření drsnosti povrchu textilie

Pro porovnání výsledků navržené metody s kontaktní metodou byl nejdříve vybrán a testován systém KES. Postup pro snímání povrchu vzorku je následující. Vzorek o velikosti 20 x 20 cm byl upevněn v přístroji, který byl předem kalibrován pro měření povrchových charakteristik. Dotykový hrot se posouval po náhodně vybraných dvoucentimetrových úsecích, a to vždy třikrát po osnově i po útku. Podrobnější postup měření drsnosti povrchu textilie systémem KES je uveden v teorii v kapitole 3.2.1. Naměřené hodnoty byly poté transformovány do MATLABU a počítány stejným algoritmem jako u navrhované metody. Obdobně byla provedena normalizace dat pro účely porovnání efektivnosti navrhované metody. Na obrázku 26 (a) - (c) je uveden barevný obraz vzorku 1, dále jeho náhodný profil a jeho šest profilů naměřených přístrojem KES. V tabulce 3 jsou uvedeny naměřené hodnoty přístrojem KES pro vzorek 1 a 12.



Obrázek 27 (a) obrázek vzorku 1, (b) jeden profil měřený přístrojem KES, (c) 6 naměřených profilů naměřených přístrojem KES

**Tabulka 3** Hodnoty naměřené přístrojem KES.

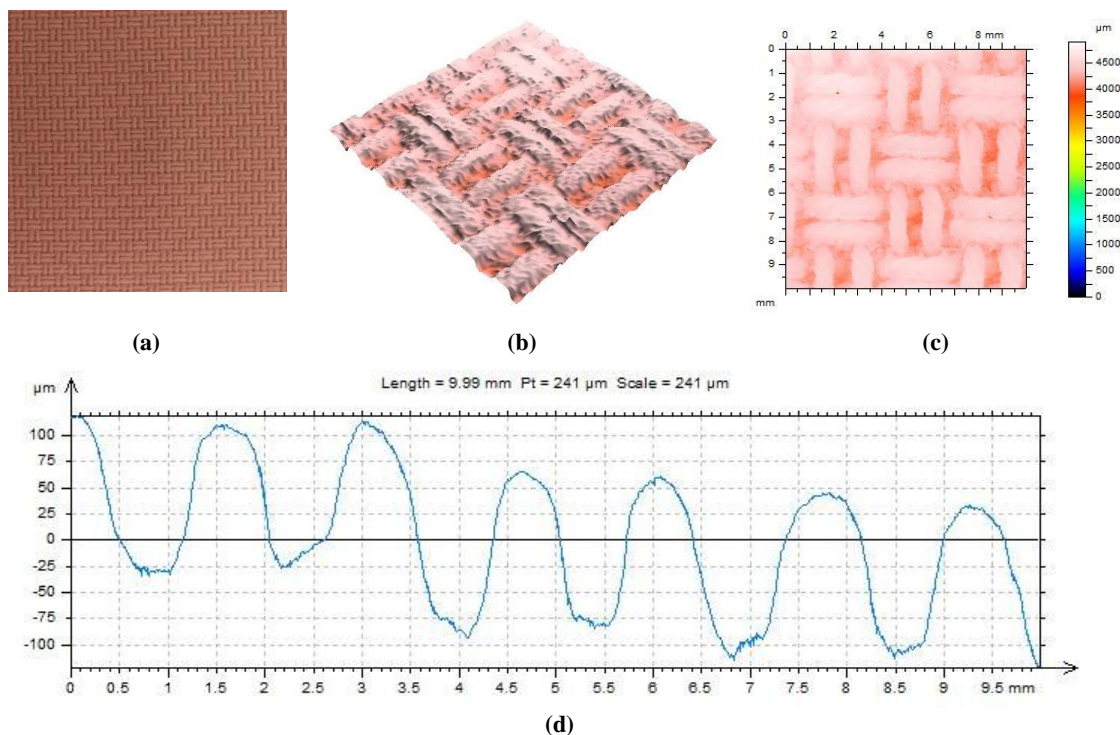
	<b>vzorek 1</b>	<b>vzorek 12</b>
MAD	0,6861	0,8378
Sp	1,896	2,9285
Sv	4,3181	1,8203
S5p	1,7889	2,3858
S5v	-0,0325	-0,0564
S10z	1,7564	2,3294
Rm	6,2141	4,7488
Šikmost	-2,0423	0,0094
Špičatost	7,8161	2,1562
Zm	0,0556	0,0359
CV	1,4574	1,1936
Z	0,0484	0,0516
tp	0,6874	0,4645
MP	0,6298	1,1888
MV	-1,6372	-1,05
PSC	1,0755	1,2798
PC	1,5986	1,8378
MS	0,6019	1,0933

## 6.2 Talysurf - bezkontaktní metoda měření drsnosti povrchu textlie

Pro porovnání výsledků s bezkontaktní metodou byl vybrán Talysurf. Parametry snímání povrchu vzorku pomocí přístroje Talysurf byly následující:

- velikost snímané plochy      1 x 1 cm
- rychlost snímání              2 mm/s
- rozlišení vzorku              1000 x 1000 dpi
- čas měření vzorku            2 hodiny 47 minut

Bližší popis snímání povrchu přístrojem Talysurf je uveden v kapitole 3.2.2 v teoretické části. Po nasnímání povrchu vzorků byly získané hodnoty opět jako v případě přístroje KES transformovány do programu MATLAB. Následně se hodnoty charakteristik opět normalizovaly. Byl proveden výpočet charakteristik stejně jako u obou předchozích metod. Jak bylo zmíněno v teoretické části, Talysurf umožňuje vykreslit naměřený 3D povrch, ze kterého lze vyextrahovat jednotlivé profily podobně jako u navržené metody. Profily vzorku 1, získané z přístroje Talysurf, jsou uvedené na obrázku 26 (a) - (c). Získané hodnoty naměřené přístrojem Talysurf pro vzorek 1 jsou uvedeny v tabulce 2.



Obrázek 28 (a) obrázek vzorku 1, (b) 3D povrch vzorku 1 získaný Talysurfem, (c) profil vzorku 1 seshora (d) profil vzorku 1 získaný Talysurfem

Tabulka 4 Hodnoty naměřené Talysurfem.

	vzorek 1	vzorek 12
MAD	0,8221	0,6387
Sp	3,7905	1,4765
Sv	0,6738	0,0084
S5p	3,7607	1,6869
S5v	-0,1381	-2,4492
S10z	3,6226	-0,7623
Rm	4,4643	1,4849
Šikmost	-0,3327	-2,2369
Špičatost	5,0257	6,7319
Zm	58,4568	67,4894
CV	1,2164	1,5656
Z	3,8413	1,849
tp	0,5467	0,726
MP	0,7379	0,4199
MV	-0,8046	-1,3426
PSC	0,1501	0,2783
PC	0,1914	0,3815
MS	0,0806	0,0577



### 6.3 Statistické zpracování výsledků

Po naměření jednotlivých charakteristik pro všechny metody měření drsnosti povrchu textilie následovalo porovnání těchto charakteristik mezi sebou. Pro porovnání metod hodnocení drsnosti povrchu textilií byla použita dvoufaktorová analýza rozptylu bez opakování pro každou charakteristiku. V této části práce byly uvažovány dva faktory:

- faktor  $X$ : použitý vzorek,
- faktor  $Y$ : metody měření drsnosti povrchu textilie.

Pro zjištění efektivnosti navrhované metody byl důležitý faktor  $Y$ . Z tohoto důvodu budou dále uváděny výsledky pro tento faktor. Pomocí dvoufaktorové analýzy se zjišťuje vliv dvou faktorů s efekty na výsledek pozorování. Výsledky pozorování  $y_{ij}$  při  $n_x$  různých úrovních faktoru  $X$  a  $n_y$  různých úrovních faktoru  $Y$  lze popsat modelem Anova pro dva faktory  $X, Y$  [15]

$$y_{ij} = \mu_{ij} + \varepsilon_{ij}, \quad (22)$$

kde  $\varepsilon_{ij}$  je náhodná chyba a  $\mu_{ij}$  lze rozložit podle vztahu

$$\mu_{ij} = \mu + \alpha_i + \beta_j + \tau_{ij} \quad (23)$$

kde  $\mu$  je celkový průměr,  $\alpha_i$  je efekt faktoru 1,  $\beta_j$  je efekt faktoru 2 a  $\tau_{ij}$  je efekt interakcí obou faktorů.

Odhady parametrů  $\mu$ ,  $\alpha_i$ ,  $\beta_j$  pak určíme ze vztahů

$$\hat{\mu} = \frac{1}{ST} \sum_{i=1}^S \sum_{j=1}^T y_{ij}, \quad (24)$$

$$\hat{\alpha}_i = \frac{1}{T} \sum_{j=1}^T y_{ij} - \hat{\mu}, \quad (25)$$

$$\hat{\beta}_j = \frac{1}{S} \sum_{i=1}^S y_{ij} - \hat{\mu}, \quad (26)$$

kde  $S$  je počet úrovní faktoru  $X$  a  $T$  je počet úrovní faktoru  $Y$ .

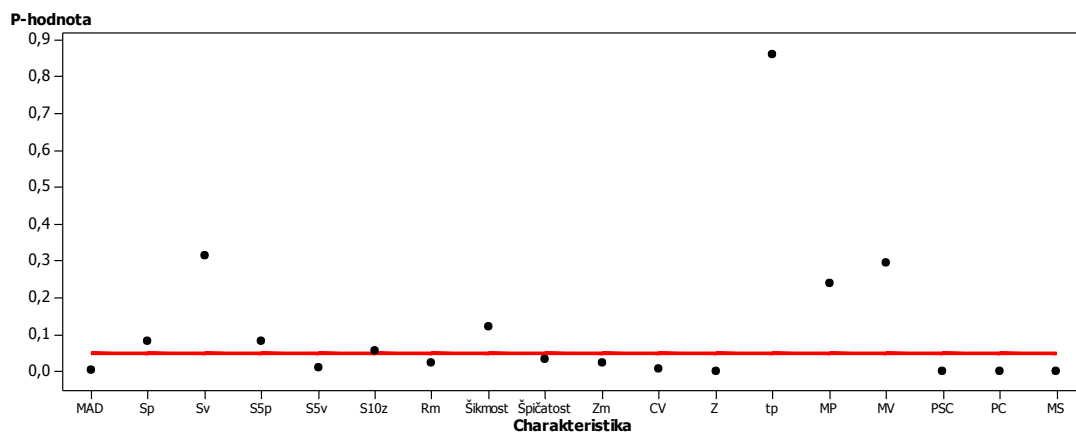
Byla zavedena nulová a alternativní hypotéza v tomto tvaru:

- $H_0$ : mezi metodami není významný rozdíl,
- $H_1$ : mezi metodami je významný rozdíl,

Pokud  $p$ -hodnota byla větší než 0,05, hypotézu  $H_0$  nezamítáme a metody jsou mezi sebou srovnatelné. Pokud  $p$ -hodnota byla menší než 0,05, nulovou hypotézu  $H_0$  zamítáme a metody mezi sebou nejsou porovnatelné. To znamená, že metody dávají odlišné výsledky charakteristik povrchu. Naměřené hodnoty byly statisticky zpracovávány v programu Minitab. Zjištěné  $p$ -hodnoty jsou uvedené v tabulce 5 a znázorněné v grafu na obrázku 28 pro jednobarevné vzorky, v grafu na obrázku 29 pro vzorované vzorky.

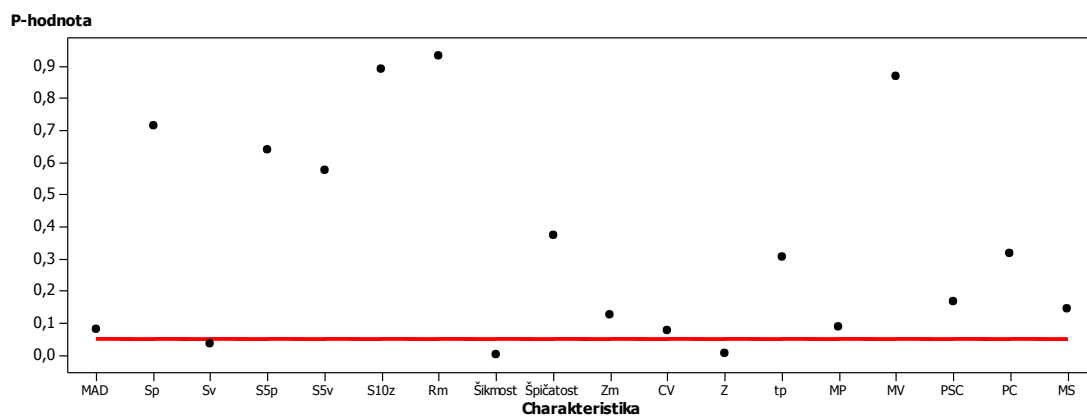
**Tabulka 5**  $P$ -hodnoty jednotlivých charakteristik.

	<b>jednobarevné vzorky</b>	<b>vzorované vzorky</b>
MAD	0,002388	0,079858
Sp	0,082948	0,714729
Sv	0,316115	0,034136
S5p	0,263358	0,638669
S5v	0,038453	0,576981
S10z	0,142011	0,893534
Rm	0,024966	0,933663
Šikmost	0,121466	0,001473
Špičatost	0,033036	0,374316
Zm	0,049778	0,124096
CV	0,005893	0,077765
Z	0,10164	0,004026
tp	0,862791	0,307478
MP	0,239343	0,088805
MV	0,294987	0,869673
PSC	5,1E-05	0,165412
PC	0,000225	0,317314
MS	0,000344	0,145728



**Obrázek 29** Znáznornění p-hodnot pro jednotlivé charakteristiky pro sadu jednobarevných textilií, kde červená linie představuje kritickou hodnotu.

Metody jsou mezi sebou srovnatelné pro jednobarevné vzorky u těchto charakteristik: Sp, Sv, S5p, S10z, Šikmost, tp, MP, MV. Ostatní charakteristiky byly dále statisticky zpracovány pro zjištění rozdíly mezi jednotlivými metodami.



**Obrázek 30** Znáznornění p-hodnot jednotlivých charakteristik pro vzorované textilie, kde červená linie představuje kritickou hodnotu.

Metody jsou mezi sebou srovnatelné pro vzorované vzorky u těchto charakteristik: MAD, Sp, S5p, S5v, S10z, Rm, Špičatost, Zm, CV, tp, MP, MV, PSC, PC, MS. Ostatní charakteristiky byly dále statisticky zpracovány pro zjištění rozdílu mezi jednotlivými metodami.

Charakteristiky, mezi kterými byl na základě dvoufaktorové Anovy potvrzen rozdíl, byly nejprve porovnány F-testem [15] pro porovnání rozptylů podle vztahu (23) pro zjištění rovnosti či nerovnosti rozptylů a podle výsledku F-testu byl vybrán příslušný dvouvýběrový t-test [15]. Nulová a alternativní hypotéza byla pro F-test definována v následném tvaru:

- $H_0: \hat{\sigma}_1^2 = \hat{\sigma}_2^2$  (rozptyly výběrů jsou shodné)
- $H_1: \hat{\sigma}_1^2 \neq \hat{\sigma}_2^2$  (rozptyly výběrů nejsou shodné)

F-test byl v následující podobě

$$F = \max\left(\frac{s_1^2}{s_2^2}, \frac{s_2^2}{s_1^2}\right), \quad (27)$$

kde  $s_1^2$  a  $s_2^2$  představují rozptyly, které se vypočítají vztahem

$$s_1^2 = \frac{\sum x_i^2 - \frac{(\sum x_i)^2}{n_1}}{n_1 - 1}, \quad (28)$$

kde  $x_i$  je hodnota rozsahu výběru  $n_1$ .

Pokud  $p$ -hodnota byla nad hodnotou 0,05, nulovou hypotézu  $H_0$  nezamítáme a u metod nebyl rozdílný rozptyl. Pokud  $p$ -hodnota klesla pod hranici 0,05, pak zamítáme hypotézu  $H_0$  a rozptyl u metod byl rozdílný.

Po zjištění rozdílnosti rozptylů F-testem následoval test shody středních hodnot. Nulová a alternativní hypotéza byla pro test shody středních hodnot definována v následném tvaru:

- $H_0: \mu_1 = \mu_2$  (střední hodnoty jsou shodné)
- $H_1: \mu_1 \neq \mu_2$  (střední hodnoty nejsou shodné)

Za předpokladu, že  $\hat{\sigma}_1^2 = \hat{\sigma}_2^2$  určeného F-testem, můžeme volit testovací kritérium ve tvaru

$$T = \frac{m_1 - m_2}{\sqrt{(n_1 - 1)s_1^2 + (n_2 - 1)s_2^2}} * \sqrt{\frac{n_1 n_2 (n_1 + n_2 - 2)}{n_1 + n_2}}, \quad (29)$$

kde  $m_i$  je střední hodnota,  $n_i$  je rozsah výběru a  $s_1^2, s_2^2$  jsou rozptyly ze vztahu (28).

Jestliže výsledná  $p$ -hodnota byla vyšší než 0,05, nezamítáme nulovou hypotézu  $H_0$  a střední hodnoty výběrů jsou shodné. Pokud  $p$ -hodnota byla menší než 0,05, přijímáme alternativní hypotézu  $H_1$  a střední hodnoty výběrů nejsou shodné.

Pokud platí vztah  $\hat{\sigma}_1^2 \neq \hat{\sigma}_2^2$  zjištěný F-testem, můžeme volit testovací kritérium vztahem

$$T = \frac{m_1 - m_2}{\sqrt{\frac{s_1^2}{n_1} + \frac{s_2^2}{n_2}}}, \quad (30)$$

Pokud výsledná  $p$ -hodnota byla vyšší než 0,05, nezamítáme nulovou hypotézu  $H_0$  a střední hodnoty výběrů jsou shodné. Jestliže  $p$ -hodnota byla menší než 0,05, přijímáme hypotézu  $H_1$  a střední hodnoty výběrů nejsou shodné.

#### 6.4 Diskuze k získaným výsledkům

Z výsledků znázorněných v tabulce 5 a v grafech na obrázcích 29 a 30 je patrné, že u jednobarevných textilií se metoda prokázala jako efektivní u osmi charakteristik. Zbylé charakteristiky byly následně dále statisticky porovnány a bylo zjišťováno, u kterých metod se tyto charakteristiky lišily. Z výsledků vyplývalo, že ve většině případů se odlišuje zejména systém KES. Příčinou může být odlišný způsob měření od zbylých dvou testovaných metoda. Může to být také tím, že systém KES se řadí mezi metody kontaktní na rozdíl od obou ostatních metod použitých v této práci. Mohlo docházet k deformaci textilie a zkreslení naměřených hodnot. V tabulkách 6, 7, 8 jsou uvedeny všechny naměřené hodnoty porovnávaných vzorků pro jednotlivé metody. Z tabulky 9 je patrné, že u jednobarevných vzorků se nejvíce lišil právě, z příčin uvedených výše. Z tabulky 10 vyplývá, že u vzorovaných textilií se lišila navrhovaná metoda u jedné charakteristiky a u zbylých dvou charakteristik se lišil Talysurf.

**Tabulka 6** Hodnoty naměřené navrhovanou metodou pro reprezentativní sadu vzorků.

	Jednobarevné textilie					Vzorované textilie	
	vzorek 1	vzorek 3	vzorek 6	vzorek 7	vzorek 29	vzorek 12	vzorek 13
MAD	0,8444	0,8723	0,8435	0,8	0,8495	0,7823	0,783
Sp	2,6156	2,148	2,4062	4,0524	2,614	4,2359	5,2794
Sv	1,6058	1,0663	1,3945	0,846	0,5773	1,0848	0,7272
S5p	2,598	2,117	3,858	2,5144	2,359	4,1249	4,7107
S5v	-0,4933	-1,7607	-0,4272	-0,4234	-0,7932	-0,4254	-0,6631
S10z	2,1047	0,3563	3,4308	2,091	1,5658	3,6995	4,0476
Rm	4,2214	3,2143	3,8007	4,8984	3,1913	5,3207	6,0066
Šikmost	-0,0706	0,108	-0,5306	-0,1188	-0,0985	0,1911	-0,119
Špičatost	2,1907	1,8081	2,3189	3,0074	2,133	3,2847	3,4061
Zm	21,1974	32,8205	51,7521	19,1073	17,1757	11,7262	10,7155
CV	1,1843	1,1464	1,1855	1,25	1,1772	1,2783	1,2771
Z	13,0508	23,7479	10,5616	12,4236	11,9865	9,904	9,8745
tp	0,4932	0,4657	0,5906	0,5131	0,493	0,482	0,5
MP	1,0708	1,3716	0,8703	0,9094	0,8201	1,0008	0,824
MV	-1,1029	-1,2073	-1,2231	-0,9724	-1,0062	-0,9993	-0,8669
PSC	0,3055	0,195	0,1581	0,3145	0,3754	0,4541	0,5036
PC	0,174	0,638	0,0961	0,232	0,3729	0,3343	0,5921
MS	0,2456	0,1654	0,1234	0,2537	0,3091	0,376	0,4189

**Tabulka 7** Hodnoty naměřené přístrojem KES pro reprezentativní sadu vzorků.

	Jednobarevné textilie					Vzorované textilie	
	vzorek 1	vzorek 3	vzorek 6	vzorek 7	vzorek 29	vzorek 12	vzorek 13
MAD	0,6861	0,5397	0,7148	0,5697	0,7429	0,8378	0,7856
Sp	1,896	5,3386	5,2943	3,8385	6,1962	2,9285	2,5636
Sv	4,3181	1,1851	1,6693	0,9189	1,9889	1,8203	2,2137
S5p	1,7889	3,5174	2,2626	4,0914	3,7184	2,3858	2,4732
S5v	-0,0325	-0,0978	-0,0269	-0,0401	-0,0567	-0,0564	-0,2254
S10z	1,7564	3,4196	2,2357	4,0513	3,6617	2,3294	2,2478
Rm	6,2141	6,5237	6,9636	4,7574	8,1851	4,7488	4,7773
Šikmost	-2,0423	-0,6375	-0,3507	-2,2315	0,1466	0,0094	-0,1664
Špičatost	7,8161	16,2563	4,5397	12,233	4,9292	2,1562	2,9631
Zm	0,0556	0,0188	0,0548	0,0592	0,0585	0,0359	0,0486
CV	1,4574	1,8528	1,3989	1,7553	1,3461	1,1936	1,2729
Z	0,0484	0,0554	0,0545	0,0528	0,0599	0,0516	0,0929
tp	0,6874	0,5181	0,4753	0,5091	0,4183	0,4645	0,49
MP	0,6298	0,6214	1,0151	0,6112	1,0747	1,1888	1,219
MV	-1,6372	-0,7611	-0,9221	-0,7209	-0,7854	-1,05	-1,1197
PSC	1,0755	0,9376	0,8851	0,6374	1,0046	1,2798	0,7819
PC	1,5986	1,3807	1,1541	0,8281	1,3623	1,8378	0,845
MS	0,6019	0,4864	0,6232	0,3549	0,747	1,0933	0,6005

**Tabulka 8** Hodnoty naměřené přístrojem Talysurf pro reprezentativní sadu vzorků.

	Jednobarevné textilie					Vzorované textilie	
	vzorek 1	vzorek 3	vzorek 6	vzorek 7	vzorek 29	vzorek 12	vzorek 13
MAD	0,8221	0,8938	0,796	0,7762	0,8046	0,6387	0,6812
Sp	3,7905	3,0798	4,3372	5,5523	4,8858	1,4765	8,1988
Sv	0,6738	1,2044	1,2206	1,8886	1,696	0,0084	0,0388
S5p	3,7607	2,7986	5,5523	4,7079	3,9231	1,6869	7,6808
S5v	-0,1381	-0,7492	-0,117	-0,095	-0,0545	-2,4492	-0,2089
S10z	3,6226	2,0494	5,4353	4,6129	3,3781	-0,7623	7,4719
Rm	4,4643	4,2842	5,5578	7,4409	6,5818	1,4849	8,2376
Šikmost	-0,3327	-0,0233	-0,7856	-0,3941	0,0219	-2,2369	-2,624
Špičatost	5,0257	1,6807	4,9717	7,4536	5,4139	6,7319	34,6498
Zm	56,6703	126,6122	28,1633	22,6303	47,3608	67,4894	32,7334
CV	1,2164	1,1188	1,2563	1,2883	1,2428	1,5656	1,468
Z	3,8413	3,1953	4,0725	2,8952	5,0346	1,849	2,9825
tp	0,5467	0,5116	0,5868	0,5305	0,4913	0,726	0,5453
MP	0,7379	0,8421	0,7853	0,783	0,8247	0,4199	0,659
MV	-0,8046	-0,9868	-0,8238	-0,8537	-0,7812	-1,3426	-0,6526
PSC	0,1501	0,0667	0,2149	0,3308	0,1953	0,2783	0,3738
PC	0,1914	0,0837	0,272	0,4035	0,1953	0,3815	0,5337
MS	0,0806	0,0331	0,1281	0,2026	0,0824	0,0577	0,1197

**Tabulka 9** Porovnání metod pro jednotlivé charakteristiky pro jednobarevné vzorky 1, 3, 6, 7, 29.

Charakteristika	Neliší se	Liší se
MAD	Navrhovaná metoda - Talysurf	KES
S5v	Navrhovaná metoda - Talysurf	KES
Rm	Talysurf - KES	navrhovaná metoda
Špičatost	Talysurf - KES	navrhovaná metoda
Zm	Navrhovaná metoda - Talysurf	KES
CV	Navrhovaná metoda - Talysurf	KES
PSC	Navrhovaná metoda - Talysurf	KES
PC	Navrhovaná metoda - Talysurf	KES
MS	Navrhovaná metoda - Talysurf	KES

**Tabulka 10** Porovnání metod pro jednotlivé charakteristiky.

Charakteristika	Neliší se	Liší se
Sv	Talysurf - KES	Navrhovaná metoda
Šikmost	Navrhovaná metoda - KES	Talysurf
Z	Navrhovaná metoda - KES	Talysurf

## 7 Závěr

Hlavním cílem této práce bylo navrhnout efektivní, rychlou a přístrojově nenáročnou metodu objektivního hodnocení drsnosti povrchu textilií s využitím metody gradientních polí. Zpracování obrazů vzorků a vytvoření algoritmu probíhalo v programu MATLAB. Pro experiment byly použity vzorky, které se lišily v materiálovém složení, vzoru, barvě, dostavě apod. Vzorky byly rozděleny na dvě sady - jednobarevné a vzorované. Výstupem této metody byly povrchové charakteristiky jednotlivých vzorků, které byly pro zjištění efektivnosti navrhované metody porovnány s ostatními metodami hodnocení drsnosti povrchu textilií - kontaktní i bezkontaktní metodou.

Nejdůležitější součástí navrhované metody byla 3D rekonstrukce povrchu s využitím metody gradientních polí. Tato sada čtyř obrazů vznikla nasnímáním vzorků šikmým osvětlením. Ze sady čtyř obrazů vzorků byly odhadnuty dva gradientní obrazy. Aplikováním Frankot - Chellappova algoritmu, který je založen na metodě gradientních polí vznikl rekonstruovaný 3D povrch. Každý řádek tohoto 3D profilu představuje jednotlivé profily povrchu z nichž byly následně počítány jednotlivé povrchové charakteristiky dle normy. Pro zjištění efektivnosti navržené metody se vypočtené charakteristiky porovnaly s kontaktní i bezkontaktní metodou měření drsnosti povrchu. Systém KES byl vybrán jako zástupce kontaktních metod a přístroj Talysurf jako zástupce bezkontaktních metod. Všechny naměřené hodnoty získané ze dvou metod byly transformovány do programu MATLAB. U navrhované metody byl také zkoumán vliv vzoru a barvy jednotlivých vzorků na výsledky navrhované metody. Systém KES a přístroj Talysurf tyto vlastnosti při měření eliminují.

Výsledky testovaných metod byly porovnány pomocí dvoufaktorové Anovy. Navržená metoda pro měření drsnosti povrchu textilií s využitím metody gradientních polí ukázala velmi dobré výsledky v porovnání s kontaktní i bezkontaktní metodou jak pro jednobarevné, tak i pro vzorované vzorky. Na základě získaných výsledků bylo zjištěno, že se ve většině případů liší přístroj KES, což je pravděpodobně zapříčiněno odlišným principem měření drsnosti povrchu textilie od obou použitých metod. Systém KES měří pouze jednotlivé dvoucentimetrové úseky třikrát pro útek a třikrát pro osnovu. Tento systém se také řadí ke kontaktním metodám měření drsnosti povrchu textilií na rozdíl od Talysurfu a navrhované metody použité v této práci.



Na základě výsledků a porovnání metod hodnocení drsnosti povrchu textilií v této práci lze konstatovat, že navrženou metodu lze efektivně použít pro jednobarevné i vzorované textilie.

## **Seznam použité literatury:**

- [1] Semnani, D., Hasani, H., Behtaj, S., Ghorbani, E.: Surface Roughness Measurement of Weft Knitted Fabrics Using Image Processing, *Fibers & Textiles in Eastern Europe*, Vol. 19, s. 55-59, May/June 2011.
- [2] Militký, J., Mazal, M.: Image analysis method of surface roughness evaluation, *International Journal of Clothing Science and Technology*, Vol. 19, s. 186-193, 2007.
- [3] Bueno, M. A., Durand, B., Renner, M.: A Non-Contact Measurement of the Roughness of Textile Fabrics, *Experimental Techniques*, s. 23-27, March/April 2000.
- [4] Militký J., Bajzík, V.: Surface Roughness and Fractal Dimension, str. 91-113, *J. Text. Inst.*, 20001, 92 Part 3
- [5] Sul, I. H., Hong, K. H., Shim, H., Kang, T. J.: Surface Roughness Measurement on Nonwovens Using Three-dimensional profile Data, *Textile Research Journal* 76(11), 828-834, 2006
- [6] Park, K. H., Kwon, Y. H., Oh, K. W.: The Surface Roughness Measurement for Textiles Fabrics by a Non-Contact Method for Tactile Perception. In. *College of Advanced Technology, Kyung Hee University, Korea*, 2010
- [7] Xin, B., Hu, J., Baciú, G.: Visualisation of Textile Surface Roughness Based on Silhouette Image Analysis, *Textile Research Journal* 80(2), 166-176, 2010
- [8] Militký, J., Bleša, M.: Evaluation of Patterned Fabric Surface Roughness, *Technical University of Liberec*, 2006
- [9] Bajzík, V.: Hodnocení omaku textilií, disertační práce, TU v Liberci, 2009
- [10] Bumbálek, B., Odvody, V., Ošťádal, B.: *Drsnost povrchu*, SNTL, Praha, 1989
- [11] Seligová, M.: Porovnání metod měření drsností textilií, diplomová práce, TU v Liberci, 2004
- [12] ČSN EN ISO 25178-601 Geometrické požadavky produktu (GPS) - Textura povrchu: Plocha - Část 601: Jmenovité charakteristiky dotykových (hrotových) přístrojů. Praha: Český normalizační institut.

[13] ČSN EN ISO 25178-602 Geometrické požadavky produktu (GPS) - Textura povrchu: Plocha - Část 601: Jmenovité charakteristiky bezdotykových přístrojů (konfokální chromatická sonda. Praha: Český normalizační institut.

[14] Agrawal, A., Chellappa, R.: An Algebraic Approach to Surface Reconstruction from Gradient Fields. 8th European Conference on Computer Vision. Vol. 1, s. 174-181, USA, 2005.

[15] Militký, J. a M Meloun. 2004. Statistická analýza experimentálních dat. Praha: Academia. ISBN 80-200-1254-0

## **Seznam příloh**

Příloha 1: Naměřené hodnoty pro vzorky nepoužité v porovnání

Příloha 2: Zdrojový kód algoritmu pro hodnocení drsnosti povrchu textilií

Na přiloženém CD jsou uloženy všechny původní obrazy textovaných sad včetně zdrojových kódů pro jednotlivé metody.

## **PŘÍLOHOVÁ ČÁST**

# Příloha 1

**Tabulka 11 Naměřené hodnoty neporovnávaných vzorků.**

	vzorek 2	vzorek 4	vzorek 5	vzorek 8	vzorek 9	vzorek 10
MAD	0,855476	0,8333	0,8680	0,798331	0,791636	0,768136
Sp	2,172827	2,4461	2,3093	4,170783	3,67761	2,449385
Sv	1,815877	0,9521	0,0010	1,459725	1,853098	2,255412
S5p	2,113295	x	x	3,994259	3,618352	2,386004
S5v	-1,56187	-0,8725	x	-0,30319	-0,34532	-0,432
S10z	0,551425	0,1275	x	3,691071	3,273031	1,954006
Sq	1	1	1	1	1	1
Rm	3,988704	3,3983	2,3103	5,630508	5,530708	4,704797
Šikmost	-0,51817	-0,2615	-0,2409	0,100293	-0,50511	-1,09899
Špičatost	2,097017	2,4401	1,9372	2,935178	3,181699	3,519585
Zm	34,73706	27,1922	21,8061	23,07236	15,69379	23,2666
CV	1,16894	1,2001	1,1520	1,252613	1,263206	1,301852
Z	34,44053	x	x	23,56055	15,81739	25,03555
tp	0,578218	0,5134	0,5450	0,49811	0,544804	0,646741
MP	0,945321	x	x	0,977335	0,95172	0,731434
MV	-1,55778	-0,9917	x	-0,96229	-1,18939	-1,27518
PSC	0,224726	0,2291	0,2470	0,266537	0,377283	0,285289
PC	0,132615	0,1152	0,2119	0,169532	0,213651	0,221604
MS	0,18325	0,1875	0,2095	0,212672	0,304416	0,227043

**Tabulka 12 Naměřené hodnoty neporovnávaných vzorků.**

	vzorek 11	vzorek 14	vzorek 15	vzorek 16	vzorek 17	vzorek 18
MAD	0,778657	0,74719	0,825251	0,8702	0,81173	0,809642
Sp	3,795168	6,448969	3,113248	2,4656	4,755289	3,770129
Sv	0,447889	1,751274	1,662123	0,0040	0,788657	1,735992
S5p	3,561962	5,938295	3,011438	x	4,443235	3,487301
S5v	-0,48676	-0,15051	-0,28526	x	-0,31726	-0,36398
S10z	3,075205	5,787787	2,726174	x	4,125979	3,123325
Sq	1	1	1	1,0000	1	1
Rm	4,243057	8,200243	4,775371	2,4696	5,543947	5,506121
Šikmost	-0,68201	-0,00627	0,347422	0,2367	-0,02416	-0,22047
Špičatost	3,461184	5,020784	2,367407	1,8583	2,681759	2,726402
Zm	18,84889	11,49674	12,34835	35,3013	11,57325	18,78115
CV	1,284263	1,338348	1,211753	1,1492	1,231937	1,235113
Z	21,39274	11,80152	12,41696	x	12,49921	18,92269
tp	0,585548	0,496415	0,424845	0,4548	0,502051	0,525387
MP	0,815227	0,863668	1,290682	x	0,965135	1,017662
MV	-1,15112	-0,85341	-1,0344	x	-1,02336	-1,0787
PSC	0,400196	0,465408	0,560365	0,1499	0,492466	0,33393
PC	0,399376	0,532553	0,442158	0,1120	0,45313	0,215733
MS	0,287054	0,375645	0,449344	0,1160	0,415646	0,269244

**Tabulka 13 Naměřené hodnoty neporovnávaných vzorků.**

	vzorek 19	vzorek 20	vzorek 21	vzorek 22	vzorek 23	vzorek 24
MAD	0,794328	0,80992	0,843297	0,799735	0,79837	0,793244
Sp	6,47278	3,284504	3,312071	3,795169	4,213141	3,812032
Sv	1,827027	1,510294	1,851396	1,896911	2,064918	1,561296
S5p	5,712693	3,171686	3,145018	3,705631	4,105131	3,759609
S5v	-0,16707	-0,33134	-0,62634	-0,18289	-0,12074	-0,25073
S10z	5,545628	2,840348	2,51868	3,522739	3,984387	3,508881
Sq	1	1	1	1	1	1
Rm	8,299807	4,794799	5,163467	5,69208	6,278059	5,373328
Šikmost	0,070543	-0,18233	-0,0303	-0,12913	-0,04461	-0,05187
Špičatost	3,167794	2,746885	2,215416	2,954833	2,97843	3,096195
Zm	7,559582	18,13567	12,71454	10,48407	8,444707	17,70407
CV	1,258926	1,23469	1,185822	1,250415	1,252551	1,260647
Z	7,651349	18,29808	12,7097	10,58041	8,595278	18,06631
tp	0,502076	0,515548	0,495134	0,506601	0,499153	0,503058
MP	1,003515	0,978992	1,257397	0,988512	0,954615	0,972964
MV	-1,00591	-1,11448	-1,21824	-1,01482	-0,98138	-0,98461
PSC	0,779463	0,349033	0,491373	0,579129	0,689774	0,344349
PC	0,997885	0,238295	0,33291	0,61257	0,901737	0,246663
MS	0,627258	0,277613	0,415819	0,465499	0,56907	0,274403

**Tabulka 14 Naměřené hodnoty neporovnávaných vzorků.**

	vzorek 25	vzorek 26	vzorek 27	vzorek 28	vzorek 30
MAD	0,829955	0,803496	0,822982	0,798674	0,836624
Sp	3,829034	3,634431	3,335976	4,749239	3,100646
Sv	1,76086	1,771223	1,859087	1,768724	1,081168
S5p	3,670133	3,531754	3,243498	4,444595	3,048374
S5v	-0,35913	-0,21898	-0,35225	-0,1534	-0,74852
S10z	3,311004	3,312769	2,891252	4,291192	2,29985
Sq	1	1	1	1	1
Rm	5,589894	5,405654	5,195062	6,517963	4,181815
Šikmost	0,090083	-0,0627	0,01255	-0,08559	0,230559
Špičatost	2,413624	2,830963	2,483354	2,988443	2,250642
Zm	6,922651	10,60021	9,888278	9,40982	10,36889
CV	1,204884	1,244561	1,215094	1,252076	1,19528
Z	6,943057	10,65619	9,924243	9,63279	11,09254
tp	0,485584	0,504261	0,493053	0,513848	0,466059
MP	1,15768	1,061844	1,121847	0,971708	1,044464
MV	-1,09599	-1,06409	-1,09286	-0,9417	-0,965
PSC	0,779512	0,568727	0,574979	0,63212	0,537569
PC	0,752077	0,510632	0,466064	0,863238	0,459878
MS	0,677984	0,467275	0,485735	0,509694	0,45401

x... hodnoty u vzorků 4, 5, 16 nebyly vypočítány z důvodu materiálového nedostatku

## Příloha 2

### Zdrojový kód algoritmu

#### %% Diplomová práce

```
%% Nastavení cesty
path(path, '../skripty')
cd('../V1-p') % načtení vzorku
clear, clc, close all % vymazat příkazové okno, uložené
prvky, zavřít vše
%% Načtení sady čtyř obrazů
for i=1:4
    Irgb=imread([num2str(i) num2str(i) '.jpg']); % načtení sady
    obrazů nasvícených šikmo ze 4 stran
    figure, imshow(Irgb), rectangle('Position', [296 944 2000
    2000], 'EdgeColor', 'r') % označení výřezu červeným čtvercem
    Irgb=imcrop(Irgb, [944 296 2000 2000]); % výřez obrazu na velikost
    2000 x 2000 pixelů
    Irgb=imresize(Irgb, 1/4); % zmenšení obrazu o 1/4
    Ig1=rgb2gray(Irgb); % převod barevného obrazu na
    šedotónový
    Ig=imadjust(Ig1); % úprava kontrastu obrazu (nebo
    Ig=imadjust(Ig, [0.2 0.8])); % převedení sady obrazů do třídy
    uint8
end
figure, imshow(Ig1), % zobrazení obrazu Ig1
title('Obraz před úpravou kontrastu')
figure, imhist(Ig1(:, :, 1)), title('Histogram obrazu před úpravou
kontrastu') % zobrazení histogramu obrazu Ig1
xaxe=xlabel('stupeň šedi'); % popis osy x
set(xaxe, 'Units', 'Normalized', 'Position', [1, -0.15, 0]);
% nastavení pozice popisku osy x
yaxe=ylabel('četnost', 'Rotation', 0); % popis osy y
set(yaxe, 'Units', 'Normalized', 'Position', [-0.05, 1, 0]);
% nastavení pozice popisku osy y

figure, imshow(Ig), % zobrazení obrazu Ig
title('Obraz s upraveným kontrastem')
figure, imhist(Ig), % zobrazení histogramu obrazu Ig
title('Histogram obrazu s upraveným kontrastem')
xaxe=xlabel('stupeň šedi'); % popis osy x
set(xaxe, 'Units', 'Normalized', 'Position', [1, -0.15, 0]);
% nastavení pozice popisku osy x
yaxe=ylabel('četnost', 'Rotation', 0); % popis osy y
set(yaxe, 'Units', 'Normalized', 'Position', [-0.05, 1, 0]);
% nastavení pozice popisku osy y

figure, imshow(I(:, :, 1)), title('Horní nasvícení') % zobrazení sady čtyř
obrazů osvícených šikmo ze 4 stran
figure, imshow(I(:, :, 2)), title('Levé nasvícení')
figure, imshow(I(:, :, 3)), title('Spodní nasvícení')
figure, imshow(I(:, :, 4)), title('Pravé nasvícení')

%% Odhad gradientu gx a gy
gx=uint8(255*mat2gray(double(I(:, :, 2))-double(I(:, :, 4)))); % odečtení
obrazu osvíceného zleva od obrazu osvíceného zprava
```



```

gy=uint8(255*mat2gray(double(I(:, :, 1))-double(I(:, :, 3)))); % odečtení
obrazu osvětleného shora od obrazu osvětleného zdola
figure,imshow(gx,[]),title('Gradient ve směru x') % zobrazení
gradientu ve směru osy x
figure,imshow(gy,[]),title('Gradient ve směru y') % zobrazení
gradientu ve směru osy y

%% Frankot- Chelappův algoritmus pro rekonstrukci povrchu
disp('=====');
disp('Algorithm II. Frankot-Chellappa Algorithm')
r_ls = frankotchellappa(gx,gy); % aplikace Frankot-Chellapova
algoritmu pro rekonstrukci povrchu z odhadu gx a gy
r_ls = r_ls - min(r_ls(:)); % snížení 3D povrchu na nulu
vel_filtr=31; % filtr o velikosti 31x31
h = fspecial('gaussian', vel_filtr, 15); % aplikace Gaussova filtru s
velikostí vyhlazovacího jádra 15
k=imfilter(r_ls,h,'symmetric'); % vyrovná prohnutý obraz do
2D

o=r_ls-k; % odečte se prohnutý obraz od
filtrovaného- narovnaného a získá se rovný povrch
o=o(vel_filtr:end-vel_filtr,vel_filtr:end-vel_filtr); % výřez okrajů
obrazů o velikost filtru
mydisplay(o); % zobrazení obrazu O
axis on;title('Frankot Chellappa');
view(0,90)

figure,surf(flipud(o)) % korelaci u imfilter se obraz převrátí,
flipud ho vrátí do stejné pozice
shading interp
colormap gray
view(0,90),title('3D povrch')

%% Výpočet charakteristik
I22=uint8(255*mat2gray(o)); % převedení obrazu na šedotónový obraz
C11=mean2(I22); % výpočet průměru z obrazu I22
I2=(I22-C11); % odečtení průměru od obrazu I22
I2=(double(I22)-double(mean2(I22)))/double(std2(I22)); % normalizace
hodnot
[r s]=size(I2); % zjištění počtu řádků a sloupců v obraze
vysledek=[]; % vytvoření prázdné matice
CL=mean2(I2); % střední linie profilu
kk=32.46; % kalibrace - 1cm je 308 pix (1pix je
32.46 mikrometru)
for ii=1:r;
    profil=I2(ii,:); % jednotlivé profily R
    n=length(profil);
    rozdil=(profil-CL); % Ri-R průměrné=zxy
    Sap=(sum(abs(rozdil))/n); % střední aritmetická odchylka profilu
MAD
    Sqp=sqrt(mean(rozdil.^2)); % střední kvadratická odchylka profilu
SD
    Spp=(max(rozdil)); % vzdálenost mezi největším výstupkem
jednotlivých profilu a průměrnou rovinou Rmax
    Svp=abs(min(rozdil)); % vzdálenost mezi průměrnou rovinou a
největší prohlubni jednotlivých profilu Rmin
    cm3=mean((rozdil).^3); % třetí centrální moment
    sikmostp=cm3/((std2(I2)).^3); % šikmost
    cm4=mean((rozdil).^4); % 4.centrální moment
    spicatostp=cm4/((std2(I2)).^4); % špičatost

```

```

%% Výpočet průměrné výšky vrcholů a pěti největších vrcholů
vystupek1=profil>CL;
vystupek1=vystupek1.*profil;
vysledek3=[];
mask=1;
for i=mask+1:1:length(vystupek1)-mask
    if vystupek1(i-mask)<=profil(i) &&
vystupek1(i+mask)<=vystupek1(i);
        vysledek3=[vysledek3; i vystupek1(i)];
    end
end
vysl4=vysledek3(:,2);
MPi=vysl4(vysl4~=0)-CL;
[a b]=size(MPi);
Zp=r/(a-1); % střední rozteč místních výstupků Z
MPp=(mean(MPi));
S5pi=max(MPi);
%% Výpočet průměrné výšky prohlubní a pěti největších prohlubní
prohluben=profil<CL;
prohluben=prohluben.*profil;
vysledek2=[];
mask=1;
for i=mask+1:1:length(prohluben)-mask
    if prohluben(i-mask)>=profil(i) &&
prohluben(i+mask)>=prohluben(i);
        vysledek2=[vysledek2; i prohluben(i)];
    end
end
vysl5=vysledek2(:,2);
MVi=vysl5(vysl5~=0)-CL;
MVp=(mean(MVi));
S5vi=max(MVi);
%% Výpočet nosného podílu
pr3=0;
for kkk=1:length(profil);
    pr=I2(kkk,:);
    pr2=sum(pr>CL);
    pr3=pr3+pr2;
end

tp1=pr3/r;

PSCp=sqrt(mean(diff(rozdil).^2));
PCp=sqrt(mean((diff(rozdil,2).^2)));
MSP=mean(abs(diff(rozdil)));
vysledek=[vysledek; ii Sap Spp Svp sikmostp spicatostp Zp MPp MVp
tp1 PSCp PCp MSP S5pi S5vi Sqp];
end

Sa=mean(vysledek(:,2)); % MAD
Sq=std2(I2); % střední kvadratická odchylka
profilu SD
Sp=max(vysledek(:,3)); % maximální výška profilu
Sv=min(vysledek(:,4)); % maximální prohlubeň profilu
St=(Sp+Sv); % největší výška nerovností profilu
Rm
sikmost=mean(vysledek(:,5)); % šikmost
spicatost=mean(vysledek(:,6)); % špičatost
Z=mean(vysledek(:,7)); % střední rozteč místních výstupků
profilu

```

```

MP=mean(vysledek(:,8)); % průměrná výška vrcholů profilu
MV=mean(vysledek(:,9)); % průměrná hloubka prohlubní
tp=tp1/length(profil); % nosný podíl
PSC=mean(vysledek(:,11)); % průměrný čtverec směrnice profilu
PC=mean(vysledek(:,12)); % průměrná křivost
MS=mean(vysledek(:,13)); % průměrná směrnice profilu

max1=sort(vysledek(:,14),'descend');
min1=sort(vysledek(:,15),'ascend');
S5p=mean(max1(1:5)); % prvních pět nejvyšších vrcholů
profilu
S5v=mean(min1(1:5)); % prvních pět nejnižších prohlubní
profilu
S10z=S5p+S5v; % výška nerovností profilu z deseti
bodů TP
Sq2=mean(vysledek(:,16));

%% Výpočet střední rozteče nerovností profilů Z
prusecik=[];
x=1:r;
for ii=1:length(I2)
    profil=I2(ii,:);
    for i=2:length(x);
        k=(profil(i)-profil(i-1))/(x(i)-x(i-1)); % zjištění směrnice
        přímky
        q=profil(i-1)-k*x(i-1); % zjištění absolutního členu přímky
        if (CL-q)/k>x(i-1) && (CL-q)/k<x(i);
            prusecik=[prusecik; (CL-q)/k;];
        end
    end
end
[p q]=size(prusecik);
pks=findpeaks(prusecik);
pks2=mean(pks);
prusecikInv=1.01*max(prusecik)-prusecik;
[Minima,MinIdx]=findpeaks(prusecikInv);
Minima=prusecik(MinIdx);
pks3=mean(Minima);
rr=(pks2-pks3)*2;
kk=p/r;
Zm=rr/(kk-1);

CV=Sq/Sa; % Variační koeficient výšky profilu
CV=SD/MAD

figure,plot(I2(:,:)), title('Jednotlivé profily naskládané na sebe'),hold on % zobrazení jednotlivých profilů
naskládaných na sebe
plot(CL*ones(r),'r');
tab=struct('MAD',{Sa},'Sp',{Sp},'Sv',{Sv},'S5p',{S5p},'S5v',{S5v},'S10z',{S10z},'SD_Sq',{Sq},'Rm',{St},'Sikmost',{sikmost},'Spicatost',{spicatost},'Zm',{Zm},'CV',{CV},'Z',{Z},'tp',{tp},'MP',{MP},'MV',{MV},'PSC',{PSC},'PC',{PC},'MS',{MS})
tabu=struct2cell(tab); % načtení hodnot do tabulky

```